

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

«

»

2019 р.

Дипломна робота

освітньо-кваліфікаційного рівня « бакалавр »
(назва ОКР)

з напрямку підготовки (спеціальності) 6.051003 «Приладобудування»
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: Лабораторна робота: Мікромеханічний
інерціально-вимірювальний модуль MAX21105

Виконав: студент IV курсу, групи ПГ-51
(шифр групи)

Матвієнко Давид Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к. т. н., доцент, Аврутов В.В
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.05100303 –
прилади і системи орієнтації та навігації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Н.І. Бурау

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Матвієнко Давида Романовича

1. Тема роботи **«Лабораторна робота: Мікромеханічний інерціально-вимірювальний модуль МАХ 21105»**, керівник роботи Аврутов Вадим Вікторович, канд. тех. наук, доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи: 11.06.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи: живлення - напруга 1,8 В; струм 1,9 мА; габаритні розміри 3х3х0,83 мм; діапазон робочих температур -40...+85°C;

параметри гіроскопів - діапазон вимірювання кутової швидкості ± 250 град/с; чутливість 120 цифр.знач./град/с; стабільний зсув нуля гіроскопу $\pm 4^\circ$ /год; дрейф гіроскопу від зміни температури $0,025^\circ/\text{с}/^\circ\text{C}$; похибка нульової кутової швидкості ± 6 град/с; випадкове блукання кутової швидкості (ARW) $0,45\ 4^\circ/\sqrt{\text{год}}$; нелінійність 0,1% діапазону вимірювання кутової швидкості; коефіцієнти перехресного зв'язку $\pm 1\%$; дрейф від лінійного прискорення $\pm 0,05$ град/с/г; частота вихідних даних 200 Гц;

параметри акселерометрів – діапазон вимірювання прискорення $\pm 2g$; чутливість 15 цифр.знач./mg; залежність зсуву нуля акселерометра від зміни температури

$\pm 2,25 \text{ mg/}^\circ\text{C}$; коефіцієнти перехресного зв'язку $\pm 1\%$; частота вихідних даних 400 Гц;

4. Зміст роботи:

- Інформаційно-аналітичний огляд літератури за темою дипломної роботи;
- Розробка опису лабораторної роботи;
- Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів на прикладі аналізу варіацій Алана для гіроскопів та акселерометрів;
- Оформлення пояснювальної записки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація в форматі Microsoft PowerPoint (*.ppt) або Adobe Acrobat (*.pdf).

6. Дата видачі завдання: 14.02.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Інформативно-аналітичний огляд літератури.	01.03.2019	
2.	Розробка опису лабораторної роботи.	01.05.2019	
3.	Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів на прикладі аналізу варіацій Алана для гіроскопів та акселерометрів	01.06.2019	
4.	Підготовка пояснювальної записки	11.06.2019	

Студент

Д.Р. Матвієнко

Керівник роботи

В.В. Аврутов

Скорочення

MEMS – мікромеханічна система

МІФІ –Московський інженерно-фізичний інститут

ІВМ – інерціально вимірювальний модуль

МБФ – модуляція білої фази

ФММ – фазова модуляція мерехтіння

DPS - degree per second – градус в секунду

Анотація

Дипломна робота на тему « Лабораторна робота: мікромеханічний інерціально-вимірювальний модуль MAX21105» містить 65 сторінок, 47 рисунків, 3 таблиці, 4 додатки, використано 12 літературних джерел.

В даній роботі оформлена пояснювальна записка в якій описуються MEMS-датчики різних виробників і принцип дії. Розроблений хід виконання лабораторної роботи на основі датчика MAX21105 на базі плати MinD EV Kit і програмного забезпечення для зняття даних Evaluation Kit.

В роботі досліджувалися зчитані данні гіроскопа та акселерометра через варіації Аллана і їх похибки. В середовищі Matlab був реалізований код обробки даних методом варіацій Аллана і таких похибок як випадкове блукання кута, випадкове блукання швидкості і нестабільність зміщення нуля. По результату досліджень побудовані графіки і оцінені на точність виміри.

Ключові слова: датчик кутової швидкості, MEMS, гіроскоп, акселерометр.

Summary

Thesis on "Laboratory work: MAX21105 micromechanical inertial measurement module" contains 65 pages, 47 figures, 3 tables, 4 annexes, 12 literary sources have been used.

In this paper, an explanatory memorandum is prepared which describes the MEMS-sensors of different manufacturers and the principle of operation. The course of laboratory work is based on the MAX21105 sensor based on the MinD EV Kit and the Evaluation Kit software.

In this paper, we read the readings of the gyroscope and accelerometer data due to Allan variations and their errors. In Matlab environment, the data processing code was implemented using the Allan variation method and errors such as accidental corner wandering, accidental wandering, and zero-zero instability. According to the results of the research, graphs are constructed and evaluated for the accuracy of measurements.

Keywords: angular velocity sensor, MEMS, gyroscope, accelerometer.r.

Зміст

Вступ.....	9
1.Інформаційно-аналітичний огляд.....	11
1.1.1 MAX 21105	11
1.1.2 ADIS16465	15
1.1.3 MS9000.....	17
1.1.4 ISM330DLC	19
1.1.5 BNO055	21
1.1.6 MSG3000D	23
1.1.7 STIM210	24
1.1.8 MC3672	27
1.1.9 CRG20	28
1.10 FXLS8962AF.....	29
1.2 Принцип дії.....	30
2.Розробка опису лабораторної роботи	32
2.1 Загальні відомості	32
2.2 Основні технічні дані приладу.	32
2.3 Опис випробувального комплекту MinD EVKit.....	32
2.4 Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів.....	34
3.Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів на прикладі аналізу варіацій Алана для гіроскопів та акселерометрів	42
3.1Варіації Аллана	42
3.1.1 Визначення	43
3.1.1 Дисперсія Аллана.....	43
3.1.2 Потужність шуму	44
3.1.3 α - μ відображення	45
3.1.4 Властивості фільтра часу і частоти.....	46
3.2 Розрахунок варіацій Аллана для Matlab	47
3.3 Розрахунок похибок.....	48
3.3.1 Випадкове блукання кута.....	48
3.3.2 Випадкове блукання швидкості	52

3.3.3 Нестабільність зміщення нуля.....	55
3.4 Висновок	59
Список виокристаної літератури	60
Додаток А.....	61
Додаток Б	63
Додаток В.....	64
Додаток Г	65

Вступ

Технологія мікроелектромеханічних систем - МЕМС-технологія зародилася в США ще в 1960-і роки минулого століття. Найпершими розробками на основі МЕМС-технологій стали найпростіші резисторні і ємнісні датчики тиску і прискорення, серійні зразки яких з'явилися в США і СРСР практично одночасно в середині 1970-х років. Вперше в СРСР роботи по створенню датчиків на основі МЕМС-технологій були організовані на кафедрі мікроелектроніки Московського інженерно-фізичного інституту (МІФІ) ще на початку 1970-х років. Унікальні механічні властивості кремнію, в якому можна створювати профільовані об'ємні мікроструктури (мембрани, балки, консолі, порожнини, мікроотвори та ін.), дозволили розробити чутливі (сенсорні) і виконавчі (актюаторні) елементи для інтегральних датчиків, мікроприладів і мікросистем.

У період 1980-2000-х років на основі МЕМС-технологій були створені елементи для акселерометрів, гіроскопів, барометрів, мікрофонів, сопла для струменевих принтерів, мікродзеркала, мікродвигуни, мікрокоммутатори і інші МЕМС. МЕМС знайшли застосування в різних науково-технічних областях: оптиці, гідравліки, механіки, теплотехніки, обчислювальних машинах, а також у багатьох пристроях побутового та споживчого призначення (системах безпеки автомобілів, медичних приладах і імплантатах). В даний час розробки напівпровідникових структур на основі МЕМС-технологій ведуться в багатьох країнах - США, Японії, Німеччині, Китаї, Франції, Нідерландах, Італії, Іспанії та ін.

Підвищена увага приділяється розробкам датчиків прискорення на основі кремнієвих тензоперетворювачів, обсяг виробництва яких серед усіх типів датчиків механічних величин становлять сьогодні 16%. Датчики прискорення, відносно англійської термінології називають «акселерометрами», широко застосовуються в самих різних областях техніки цивільного призначення, таких

як подушки безпеки в автомобілях, радіокерованих апаратах, смартфонах, і військового призначення, наприклад, ракет.

Провідними виробниками мікроелектронних акселерометрів є фірми Analog Devices, Motorola, Colibrus, STMicroelectronics, Freescale Semiconductor, BGelectronics.

1. Інформаційно-аналітичний огляд

1.1 MEMС-датчики

Мікроелектромеханічні системи або скорочено MEMС представляють собою мікроскопічні технічні засоби, виконані за технології об'ємної мікромеханіки, сформованих шляхом місцевого витравлювання підложки, легування, нанесення на неї матеріалу і т. д. Підкладки, як правило, виготовляються з кремнію завдяки його великим електричним, механічним і тепловим властивостям. Розміри MEMС лежать в діапазонах від 1 мікрона до декількох міліметрів, в залежності від потужності, області застосування, наявності вбудованих схем обробки та кількості елементів.

1.1.1 MAX 21105

Датчик MAX 21105 (Рисунок 1.1) фірми Maxim Integrated. Це монолітний трьох осьовий гіроскоп з трьох осьовим акселерометром виконанні на одній інтегральній схемі, які забезпечують безпрецедентну точність в температурах і часі.



MAX 21105 має найточніші одиниці вимірювання , здатні працювати з низькими напругами живлення такою як 1.71 В , призначена для використання в наступних приладах(може використати «пристрої») і системах: вертольоти та радіоприймачі , телефони та планшети , ігрові контролери , дистанційне керування рухом і інші споживчі прилади.

Зокрема MAX 21105 має малу гіроскопічну помилку рівня нуля, низьку та лінійну залежність рівня нуля гіроскопа від температури і низьку фазову затримку гіроскопа , що робить датчик MAX 21105 ідеально підходить для стабілізації польотів і платформ стабілізації камери. 512 байтова апаратна черга дозволяє мікросхемі підтримувати режим енергозбереження довший час. MAX 21205 має малі габарити 3мм x 3мм x 0.83мм , що дозволяє застосовувати датчик в малих приладах, які перелічені вище.

До переваг пристрою відносяться:

- Точність і стабільність впливу температури для стабілізації платформи
 - нестабільність дрейфу(4 ° / год);
 - 16-бітний вбудований термодатчик;
- Низьке енергоспоживання операціями продовжує життя батареї;
 - Споживає струм 3.8 мА при низькошумлячому режимі роботи гіроскопа + акселерометр;
 - споживає 2.2 мА при режимі роботи в низькій потужності гіроскопа, в низькошумлячій роботі акселерометра;
 - В вимкненому режимі споживає 1мкА;
- Компактність зберігає місце на платі та підвищує надійність пристрою;
 - 3 мм x 3 мм x 0.83 мм;
 - Висока ударостійкість(до 10000 g);
 - Робоча температура від -40 ° C до + 85 ° C.

Датчик має такі режими[1]:

- споживання струму в режимі низького рівня шуму: цей параметр визначає типове споживання струму, коли інерційний блок 6DoF працює з найменшим шумом як для акселерометра, так і для гіроскопа.

- споживання струму в режимі малої потужності [mA]: цей параметр визначає споживання струму, коли інерційний вимірювальний пристрій 6DoF знаходиться в режимі низького енергоспоживання. У режимі низького енергоспоживання MAX21105 значно зменшує споживання енергії, але збільшує шум.

- споживання струму в режимі вимкнення живлення [mA]: цей параметр визначає споживання струму, коли вимкнений інерційний блок 6DoF. У цьому режимі механічна чутлива структура і ланцюг зчитування вимикаються. Користувачі можуть налаштувати регістр управління через інтерфейс I2C / SPI для цього режиму. Повний режим доступу до регістрів керування через інтерфейси I2C / SPI також гарантується в режимі вимкнення живлення.

- повномасштабний спектр гіроскопа [dps]: цей параметр визначає діапазон вимірювання гіроскопа в градусах за секунду (dps). Коли застосована кутова швидкість виходить за межі повномасштабного діапазону, вихід гіроскопа стає насиченим.

- нульовий сигнал [dps]: Цей параметр визначає вихід пристрою постійного струму, коли на гіроскоп не застосовується зовнішня кутова швидкість.

- чутливість гіроскопа [digit / dps]: чутливість - це відношення між 1 LSB і dps. Він може бути використаний для перетворення вимірювання цифрового гіроскопа від цифр до кутової швидкості.

- зміна рівня нульового сигналу в порівнянні з температурою [dps / ° C]: цей параметр визначає зміну рівня нульового сигналу в dps / ° C в діапазоні робочих температур.

●змiна чутливостi гiроскопа до температури [% / ° C]: Цей параметр визначає змiну чутливостi гiроскопа у вiдсотках (%) вiд дiапазону робочих температур, зазначених у специфiкацiї.

●нелiнiйнiсть гiроскопа [% FS]: цей параметр визначає максимальну абсолютну рiзницю мiж виходом гiроскопа i найкращою прямою лiнiєю у вiдсотках вiд повного масштабу гiроскопа (GFS).

●пропускна здатнiсть гiроскопа [Гц]: Цей параметр визначає частоту сигналу кутової швидкостi вiд постiйного струму до вбудованої смуги пропускання (GBWL), яку може вимiрювати гiроскоп. Для вибору смуги пропускання гiроскопа можна використовувати видiлений регiстр.

●швидкiсть гучностi шуму [dps /]Hz]: цей параметр визначає квадратний корiнь еквiвалентної щiльностi потужностi шуму кутової швидкостi гiроскопа.

●повномасштабний дiапазон акселерометра [g]: цей параметр визначає дiапазон вимiрювання акселерометра в g. Коли прикладене прискорення виходить за межi повномасштабного дiапазону, вихiд акселерометра стає насиченим.

●рiвень нульового рiвня [мг]: цей параметр визначає вихiд пристрою постiйного струму, коли зовнiшнє прискорення не застосовується до акселерометра.

●чутливiсть акселерометра [цифра / г]: чутливiсть - це вiдношення мiж LSb i g. Вiн може використовуватися для перетворення вимiрювання цифрового прискорення з цифр у g.

●змiна рiвня нульового рiвня в порiвняннi з температурою [мг / ° C]: цей параметр визначає змiну рiвня нульової g в мг / ° C в дiапазонi робочих температур.

●змiна чутливостi акселерометра на температуру [% / ° C]: цей параметр визначає змiну чутливостi акселерометра у вiдсотках (%) в дiапазонi робочих температур, вказаних у специфiкацiї.

- нелінійність акселерометра [% FS]: цей параметр визначає максимальну абсолютну різницю між виходом акселерометра та найкращою прямою лінією у відсотках від масштабу (FS).

- пропускна здатність акселерометра [Гц]: Цей параметр визначає частоту сигналу прискорення від постійного струму до вбудованої смуги пропускання (ABWL), яку може вимірювати акселерометр. Для виділення смуги пропускання акселерометра можна використовувати виділений регістр.

- щільність шуму акселерометра [мкг /]Гц]: цей параметр визначає квадратний корінь еквівалентної щільності потужності шуму лінійного прискорення акселерометра.

1.1.2 ADIS16465

Датчик ADIS16465 (Рисунок 1.2) фірми Analog Devices - це прецизійний інерційних вимірювальний модуль, виконаний за технологією MEMS (мікроелектромеханічна система), який включає в себе трьох осьовий гіроскоп і трьох осьовий акселерометр. Кожен з інерційних датчиків, що входять до складу ADIS16465, має супутню схему аналогового перетворення сигналу, яка оптимізує його динамічні характеристики. При виготовленні продукту кожен датчик піддається калібруванню чутливості, зміщення, взаємної орієнтації осей, лінійного прискорення (зміщення гіроскопа) і точки ударної дії (положення акселерометра). В результаті, кожному з датчиків відповідають власні формули динамічної компенсації, що забезпечують точні вимірювання в широкому діапазоні умов.



а)



б)

Рисунок 1.2 – а) ADIS16465 без корпусу

б) в корпусі

ADIS16465 являє собою простий і економічно ефективний інструмент для інтеграції багато-осьових інерційних вимірювань з малою похибкою в промислових системах, особливо в порівнянні зі складністю і розмірами інвестицій при використанні дискретних рішень. Всі необхідні випробування і калібрування проводять на етапі виготовлення продукту, завдяки чому час, що витрачається на його інтеграцію в систему, значно скорочується. Жорстке узгодження взаємної орієнтації осей спрощує проведення юстування інерційної системи координат в навігаційних системах. Порт SPI і набір внутрішніх регістрів забезпечують простий інтерфейс для збору даних і конфігурації пристрою.

ADIS16465 випускається в алюмінієвому модульному корпусі з габаритами приблизно 22.4 мм × 22.4 мм × 9 мм, що має 14-контактний з'єднувальний інтерфейс.

Області застосування[2]:

- навігація, стабілізація і вимірювання
- безпілотні і автономні засоби пересування
- сільськогосподарські і будівельні механізми
- промислова / заводська автоматика, робототехніка
- віртуальна / доповнена реальність

Переваги і особливості:

- Трехосевой цифровий гіроскоп;
- Моделі з динамічним діапазоном $\pm 125^\circ / \text{с}$, $\pm 500^\circ / \text{с}$, $\pm 2000^\circ / \text{с}$;
- Стабільність зміщення в сталому стані $2^\circ / \text{год}$ (ADIS16465-1);
- Випадковий догляд за кутом $0.15^\circ / \sqrt{\text{час}}$ (ADIS16465-1 і ADIS16465-2);
- Похибка взаємної орієнтації осей $\pm 0.05^\circ$;
- Трьох осьовий цифровий акселерометр, діапазон вимірювань $\pm 8 \text{ g}$;
- Стабільність зміщення в сталому стані $3.6 \times 10^{-6} \text{ g}$;
- Виходи показань по трьох осях, збільшення кута і збільшення швидкості;
- Заводське калібрування чутливості, зміщення і взаємної орієнтації осей;

- Температурний діапазон калібрування: від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$;
- Сумісний з SPI інтерфейс передачі даних;
- Програмне управління конфігурацією і робочим режимом;
- Автоматична і ручна корекція зміщення;
- Індикатор готовності для синхронного збору даних;
- Режими зовнішньої синхронізації: безпосередня, імпульсна, масштабована і вихідний сигнал SYNC;
- Само-тестування інерційних датчиків за запитом;
- Само-тестування флеш-пам'яті за запитом;
- Одно-полярної живлення (VDD): від 3.0 В до 3.6 В;
- Витримує механічні ударні навантаження до 2000 g;
- Робочий температурний діапазон: від -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

1.1.3 MS9000

MEMS датчик MS9000(Рисунок 1.3) фірми Colibrus представляє собою MEMS-ємнісний акселерометр на основі об'ємного мікромеханічного кремнієвого елемента спеціально розробленим для максимальної стабільності. Продукт малопотужний, повністю калібрований, надзвичайно стабільна електронна конфігурація забезпечує надійне живлення при скиданні і забезпечує повний захист від провалу.



Рисунок 1.3 – MEMC датчик MS9000

Він працює від однієї напруги живлення (від + 2.5V до + 5.5V) з низьким споживанням струму (<0,5 мА при 5 В). Вихідний сигнал є коефіцієнтом аналогового напруги, який змінюється в діапазоні від + 0.5V до + 4.5V для повномасштабного діапазону прискорень при напрузі живлення + 5V. Датчик повністю автономний і упакований в 20-контактний LCC керамічний корпус, таким чином забезпечуючи повну герметичність для жорстких середовищ.

Придатним для безсвинцевого процесу пайки та монтажу SMD. Він повинен бути щільно закріплений на друкованій платі, використовуючи в нижній частині корпусу в якості опорної площини для забезпечення гарного вирівнювання осі. Стрес, індукований пайкою пакета LCC є специфічною проблемою MEMS, особливо коли мова йде про високоємнісні датчики.

MS9000 подає вихідний сигнал без будь-якої внутрішньої температурної компенсації. Внутрішній температурний коефіцієнт цілком достатній

невеликий, але може бути додатково покращено за допомогою калібрування, використовуючи температуру, що забезпечується внутрішнім датчиком температури.

Вага даного датчика менша ніж 1.5 грам, а розміри приведені на рисунку (Рисунок 1.4).

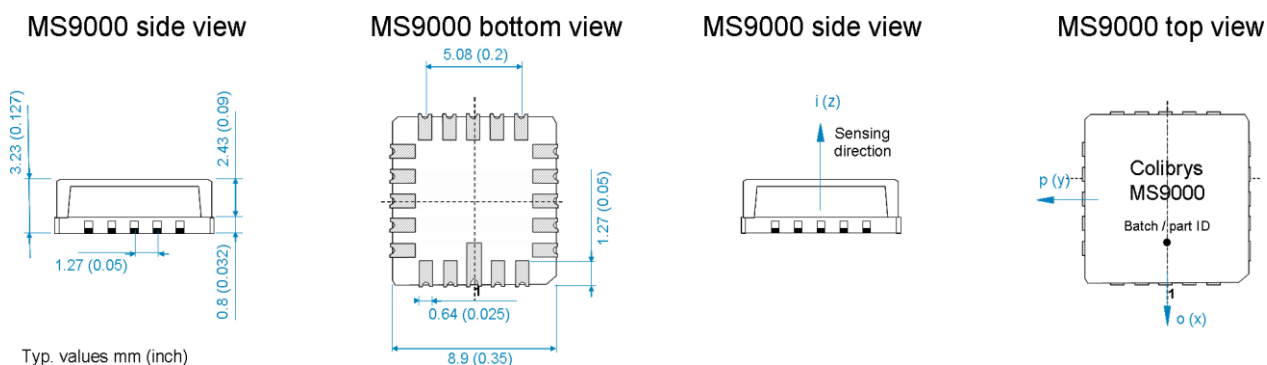


Рисунок 1.4 – Габарити MS9000

Стандартна калібрувальна напруга для MS9000.D ($V_{DD}-V_{SS}$) = 5V. Тому всі специфікації дійсні для цієї напруги, якщо не вказано інше. На вимогу ринку можливе калібрування виробу при іншій напрузі (від 2.5V до 5.5V).

Опорне напруга VAGND також забезпечується на половині джерела живлення і відповідає вихідній напрузі на нуль g. Всі датчики відкалібровані відповідно до ідеальної кривої відгуку в терміни зміщення, посилення і нелінійності.

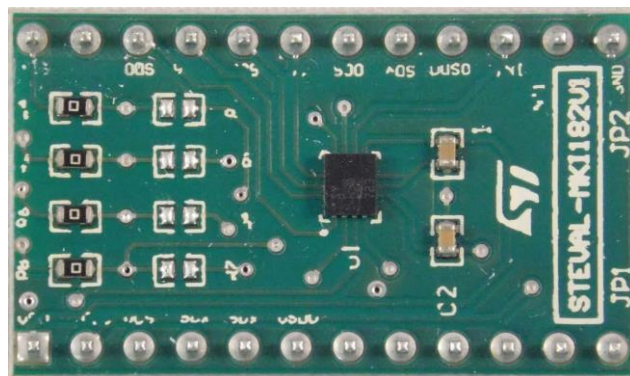
При кожному включенні живлення мікроконтролер, що використовується як пам'ять, передає параметри калібрування до ASIC, а потім переходить у сплячий режим. Під час цієї фази ініціалізації, яка займає менше 50 мс, споживання струму досягає макс. 1,5мА(5В) і при кімнатній температурі. Потім встановлюється нормальний робочий струм і залишається менше 400А при аналогічних умовах[3].

1.1.4 ISM330DLC

MEMC датчик ISM330DLC (Рисунок 1.5) розроблений фірмою STMicroelectronics. Містить високопродуктивний 3D цифровий акселерометр і 3D цифровий гіроскоп, спеціально розроблений для Industry 4.0.



а)



б)

Рисунок 1.5 – а) MEMC-датчик в змодельованому вигляді

б) MEMC датчик розпаяний на платі

ISM330DLC має повномасштабний діапазон прискорення ($\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$ g), діапазон кутової швидкості ($\pm 125 / \pm 250 / \pm 500 / \pm 1000 / \pm 2000$ dps) і здатний забезпечувати високу точність і надійність вимірювань при низькому енергоспоживанні (0,75 мА у високопродуктивному комбінованому режимі).

ISM330DLC впроваджує розумні функції, які спрощують і оптимізують розробку додатків і дозволяють використовувати комплексну інформацію з датчиками руху також у програмах, обмежених потужністю.

Переривання виявлення подій дає можливість ефективного та надійного відстеження руху та контекстуальної обізнаності, здійснюючи розпізнавання апаратних засобів подій вільного падіння, орієнтацію 6D, клік та подвійне клацання, активність або неактивність та події пробудження.

До 4 кбайт FIFO з динамічним розподілом значущих даних (тобто зовнішніми датчиками, міткою часу тощо) дозволяє загальну енергозбереження системи і захищає від втрати даних.

Завдяки функції концентратора датчиків, дані від 4 зовнішніх датчиків можуть бути зібрані та збережені у внутрішньому FIFO без втручання мікроконтролера програми.

Крім того, ISM330DLC пропонує специфічну підтримку, як для гіроскопа, так і для акселерометра, для додатків, які потребують закритого контуру управління. Пристрій, через виділений допоміжний інтерфейс SPI і конфігурований шлях обробки сигналу, що має низьку затримку і низький рівень шуму, може надавати дані для контуру управління, в той час як, в той же час, другий повністю незалежний шлях може виводити дані для інших цілей програми.

Як і весь портфель модулів датчиків MEMS, ISM330DLC використовує потужні та зрілі внутрішні виробничі процеси, які вже використовуються для виробництва мікромеханічних акселерометрів та гіроскопів. Різні чутливі елементи виготовляються з використанням спеціалізованих процесів мікрообробки, в той час як інтерфейси IC розроблені з використанням технології CMOS, що дозволяє конструювати спеціалізований контур, який зрізається, щоб краще відповідати характеристикам чутливого елемента.

В ISM330DLC чутливий елемент акселерометра і гіроскопа реалізований на тій же кремнієвій матриці, що гарантує чудову стабільність і надійність.

ISM330DLC доступний у невеликій пластиковій решітці (LGA) розміром 2,5 x 3,0 x 0,83 мм.

FXLS8962AF фірми NXP Semiconductors є компактним 3-осьовим акселерометром, призначеним для використання в широкому діапазоні автомобільних, промислових та медичних IOT додатків. Датчик підтримує як високопродуктивні, так і малопотужні режими роботи, що забезпечує максимальну гнучкість для задоволення вимог дозволу та потужності для різноманітних випадків використання. Ряд передових інтегрованих цифрових функцій дозволяє розробникам зменшити загальне споживання енергії системи та спростити збирання даних хоста.

FXLS8962AF доступний у 10-контактному пакеті DFN розміром 2 мм x 2 мм x 0,95 мм з кроком 0,4 мм і змочувальними боковими сторонами. Пристрій кваліфікований за AEC-Q100 і працює в розширеному температурному діапазоні від -40 ° C до +105 ° C.

Поєднання функцій датчиків, функцій системи енергозбереження та розширеної продуктивності над температурним діапазоном робить FXLS8962AF ідеальним акселерометром для зондування руху в IOT[4].

1.1.5 BNO055

BNO055(Рисунок 1.6) фірми Bosch Sensortec - це система в пакеті (SiP), що об'єднує тривісний 14-бітовий акселерометр, тривісний 16-розрядний гіроскоп з діапазоном ± 2000 градусів в секунду, тривісний геомагнітний датчик і 32-розрядний мікроконтролер cortex M0 + мікроконтролер.



Рисунок 1.6 – датчик BNO055

Відповідні мікросхеми інтегровані в один 28-контактний LGA 3.8 мм x 5.2 мм x 1,1 мм корпус. Для оптимальної інтеграції системи BNO055 обладнаний цифровими двонаправленими інтерфейсами I2C та UART. Інтерфейс I2C може бути запрограмований для роботи з протоколом HID-I2C, перетворюючи BNO055 в рішення для підключення датчиків з підтримкою технології plug-and-play для пристроїв з операційною системою Windows 8.0 або 8.1.

BNO055 має два окремих контакту живлення:

- VDD є основним джерелом живлення для внутрішніх датчиків
- VDDIO - це окремий контактний блок живлення, що використовується для живлення мікросхеми та цифрових інтерфейсів

Для послідовності перемикання джерел живлення VDD і VDDIO обов'язково, щоб VDD включався і приводився до заданого рівня до або одночасно з включенням VDDIO. В іншому випадку не існує обмежень на рівні напруги обох контактів відносно один одного, якщо вони використовуються в межах зазначеного робочого діапазону.

Датчик має функцію скидання живлення (POR), ініціалізуючи карту регістра за замовчуванням і починаючи з режиму CONFIG. POR виконується при кожному включенні і може також спрацювати або шляхом подачі сигналу низького рівня на nRESET-штифт принаймні для 20ns або шляхом встановлення біта RST_SYS в регістрі SYS_TRIGGER.

BNO055 може бути налаштований для роботи в одному з наступних режимів живлення: звичайний режим, режим низького енергоспоживання і режим очікування. Режим живлення може бути вибраний шляхом запису в регістр PWR_MODE, як визначено в таблиці нижче. Як за замовчуванням при запуску BNO055 буде працювати в нормальному режимі.

Датчик має такі режими роботи[5]:

- Звичайний режим

У звичайному режимі всі датчики, необхідні для вибраного режиму роботи, завжди включаються. Карта регістра і внутрішні периферійні пристрої MCU завжди працюють в цьому режимі.

- Режим низького енергоспоживання

Якщо не виявлено жодної активності (тобто відсутність руху) для налаштовуваної тривалості (за замовчуванням 5 секунд), BNO055 переходить в режим низького енергоспоживання. У цьому режимі активний лише акселерометр. Після виявлення руху (тобто акселерометра сигналізує переривання з будь-яким рухом) система прокидається і вводиться нормальний режим. Можливі наступні параметри.

- Режим очікування

У режимі призупинення система призупиняється, і всі датчики та мікроконтролер переводяться в сплячий режим. У цьому режимі не буде оновлено жодних значень у карті реєстру. Щоб вийти з режиму призупинення, режим слід змінити, записавши в реєстр PWR_MODE .

1.1.6 MSG3000D

MSG3000D(Рисунок 1.7) фірми MT Microsystems є інерційним вимірювальним блоком MEMS, що складається з 3 високоякісних гіроскопів на основі MEMS, ланцюга перемикачів потужності, програмного забезпечення блоку, внутрішньої і зовнішньої механічної структури енергетичних структур і амортизатора в мініатюрній коробці. Мікросхема MEMS, ASIC і датчик температури інтегровані і зібрані в один керамічний пакет.

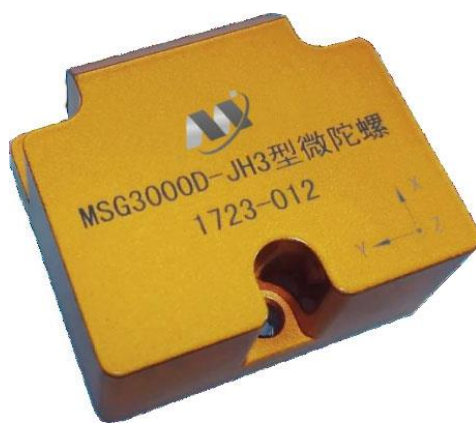


Рисунок 1.7 – Датчик MSG3000D

Для гіроскопів вони використовуються для вимірювання важкості на трьох ортонормальних осях чутливого носія. Використовуються цифрові схеми та програмне забезпечення для компенсування похибки компонента і передавання повідомлення назад в комп'ютерний контур управління, встановлений на ракеті через інтерфейс RS422. Кожна вісь відкалібрована на заводі для зміщення, чутливості та компенсована за температурними ефектами для забезпечення високої точності вимірювань в інтервалі температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Пристрій працює від одного живлення $+5\text{В}$. Між тим, MSG3000D може не тільки самостійно перевірити робочий стан інерційної складової і цифрової схеми перед запуском, але й безперервно діагностує робочий стан виробу під час роботи[6].

1.1.7 STIM210

STIM210(Рисунок 1.8) фірми Sensoror AS – це кластер із 1, 2 або 3 високоякісних гіроскопів на основі MEMS в мініатюрному пакеті. Може бути передбачена будь-яка конфігурація осей. Кожна вісь відкалібрована на заводі для зміщення, чутливості та компенсована за температурними ефектами для забезпечення високої точності вимірювань в інтервалі температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Пристрій працює від одного живлення $+5\text{В}$.



Рисунок 1.8 – Датчик STIM210

STIM210 обмінюється даними через стандартний інтерфейс RS422 високого рівня. Використання 32-бітного мікроконтролера RISC ARM забезпечує гнучкість в конфігурації, наприклад, вибір блоку виходу, частоти дискретизації, фільтра LP-частоти і частоти бітів RS422 і параметрів протоколу.

Після включення STIM210 виконає внутрішню перевірку системи та синхронізує гіроскопи. Для підтвердження повної послідовності включення живлення, вона надає спеціальні дейтаграми, що містять дані, такі як номер частини, серійний номер, кількість активних осей і параметри конфігурації, як згадано вище. Після цього STIM210 автоматично перейде до надання даних вимірювань. Підключити живлення і STIM210 забезпечить точні вимірювання гіроскопа через інтерфейс RS422 без будь-якої взаємодії з пристроєм.

Дані вимірювання передаються у вигляді пакетів даних за фіксованим форматом (дейтаграма) з інтервалами, заданими частотою дискретизації. Дейтаграма в двійковому кодованому форматі для ефективної передачі даних. На додаток до самих даних вимірювань, дейтаграма містить ідентифікатор, байт стану і байт CRC (циклічний контроль надмірності), що забезпечує високий ступінь виявлення несправностей в передачах. Байт стану позначатиме всі виявлені помилки в системі.

Для більш просунутих користувачів гіроскоп може бути поміщений в сервісний режим. У цьому режимі всі параметри конфігурації можна помірно або постійно змінювати, перезаписуючи поточні параметри у флеш-пам'яті. У

сервісному режимі команди і відповіді знаходяться в зручному для людини форматі; уможливити використання програмного забезпечення термінального типу під час типової інтеграції продукту. Сервісний режим також надає можливість виконувати поодинокі вимірювання, виконувати діагностику і отримувати більш високий рівень деталізації виявлених помилок, повідомлених у байті стану.

Особливості[7]:

- Мініатюрна упаковка
- Низький рівень шуму
- Низька нестабільність ухилу
- Чудова продуктивність в умовах вібрації та ударів
- 1, 2 або 3 осі пропонуються в одному пакеті
- Електронно калібрований вирівнювання осі
- Однокристалічна технологія кремнію
- Відсутність власних ефектів зносу
- Нечутливі до магнітних полів
- Повна відповідність ЕМІ
- Цифровий інтерфейс, RS422
- Повністю налаштовуваний:
- 5 різних частот дискретизації
- 5 різних смуг пропускання
- Фільтр LP -3dB частота може бути встановлений індивідуально для кожної осі
- Протокол RS422, швидкість передачі бітів і припинення лінії
- Вибірний вихідний блок: кутова швидкість [град / с], інкрементний кут [град], середня кутова швидкість [град / с] або інтегрований кут [°]
- Вхід для зовнішнього тригера і час виходу для активації синхронізації
- Безперервна самодіагностика
- сумісність з RoHS

1.1.8 MC3672

MC3672(Рисунок 1.9) – це трьох осьовий акселерометр з вбудованим цифровим виходом з низьким енергоспоживанням і низьким рівнем шуму, набір функцій якого оптимізований для пристроїв і датчиків руху у споживчих товарах. Програми включають споживчі товари, пристрої IoT, управління призначеним для користувача інтерфейсом, введення ігрового руху, компенсацію нахилу електронного компаса для мобільних телефонів, ігрові контролери, пульти дистанційного керування і портативні мультимедійні продукти.

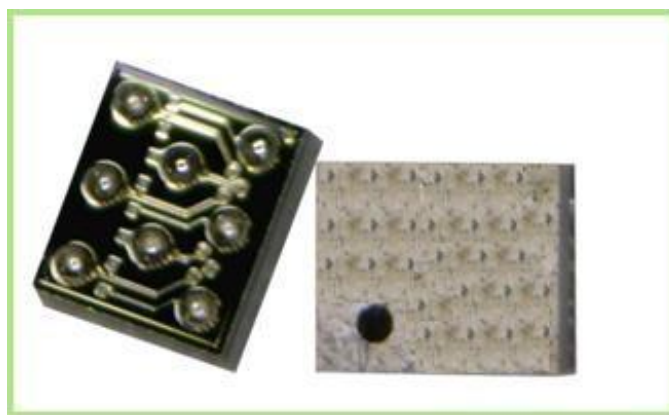


Рисунок 1.9 – Датчик MC3672

Низький рівень шуму та низька потужність притаманні монолітному підходу до виготовлення, де акселерометр MEMS інтегрований в єдину мікросхему з інтегральною схемою електроніки.

В MC3672 внутрішня частота дискретизації може бути встановлена від 14 до 1300 проб/секунду. Конкретні умови збору або збору зразків можуть викликати переривання на віддаленому MCU. Альтернативно, пристрій підтримує зчитування стану вибірки та події за допомогою опитування.

Діапазон, вибірка та потужність[8]:

- діапазони $\pm 2, 4, 8, 12$ або $16g$
- Роздільна здатність 8, 10 або 12 біт з FIFO
 - 14-бітові окремі зразки
- Частота дискретизації 14 - 1300 зразків / сек

- Зразковий тригер через внутрішній генератор, годинник або програмне забезпечення

- Ультранизька потужність з 32 прикладом FIFO

- 0,9 мкА типовий струм 25 Гц

- 1,6 мкА типовий струм 50 Гц

- 2.8 мкА типовий струм 100 Гц

- 36 мкА типовий струм 1300 Гц

1.1.9 CRG20

CRG20(Рисунок 1.10) - це новітня розробка датчиків кутової швидкості, що використовує запатентовані MEMS технологію кільцевої структури $\cos 2\theta$ від Silicon Sensing. Він призначений для задоволення вимог широкого спектра автомобільних і комерційних застосувань.



Рисунок 1.10 – Датчик SRG20

Датчик є повністю інтегрованим цифровим рішенням, що включає чутливий елемент MEMS, цифровий прийом ASIC і мікропроцесор. Це рішення з однією мікросхемою мінімізує вимоги до додаткової електроніки і тим самим зменшує вимоги до простору та загальні витрати системи. Повністю цифровий контроль із замкненим контуром усуває будь-які ефекти температури та

старіння, пов'язані з аналоговою електронікою, і забезпечує надзвичайно стабільну роботу в широкому діапазоні робочих умов.

Унікальна резонуюча кільцева структура робить гіроскоп за своєю природою несприйнятливим до високих рівнів ударів і вібрації.

На додаток до командної функції самоперевірки, CRG20 включає в себе безперервне самотестування повного функціонування датчиків і схем формування сигналу. CRG20 був розроблений для забезпечення безпрецедентної цілісності датчиків через пом'якшення потенційних джерел помилок і помилкових правдоподібних режимів відмови. Системні розробники мають можливість з CRG20 усунути вимогу щодо надлишкових датчиків у системах високої цілісності.

Датчик забезпечує цифровий інтерфейс у вигляді порту SPI® разом з аналоговими вихідними контактами для клієнтів, яким необхідно працювати в аналоговому домені. Крім того, доступні два допоміжні аналогові вхідні висновки для оцифрування інших датчиків, таких як акселерометри або додаткові гіроскопи; це дозволяє легко створювати кластери датчиків з кількома осями[9].

1.10 FXLS8962AF

FXLS8962AF(Рисунок 1.11) - це компактний 3-осьовий MEMS-акселерометр, розроблений для використання в широкому діапазоні автомобільних (зручних і безпечних), промислових та медичних ІОТ-додатків, що вимагають наднизького енергоспоживання при пробудженні при русі. Компонент підтримує як високопродуктивні режими, так і режими з низьким енергоспоживанням, що забезпечує максимальну гнучкість для відповідності дозволу і потребам в харчуванні для різних унікальних випадків використання. Ряд передових вбудованих цифрових функцій дозволяє дизайнерам знизити загальне енергоспоживання системи і спростити збір даних з хоста.



Рисунок 1.11 – Датчик FXLS8962AF

FXLS8962AF доступний в 10-контактному корпусі DFN розміром 2 x 2 x 0,95 мм з кроком 0,4 мм і змочують бічними сторонами. Пристрій відповідає стандарту AEC-Q100 і працює в розширеному температурному діапазоні від -40 ° C до + 105 ° C.

Комбінація продуктивності датчика, функцій енергозбереження системи та розширеного діапазону перегріву робить FXLS8962AF ідеальним акселерометром для вимірювання руху в IOT[10].

1.2 Принцип дії

Акселерометр вимірює прискорення шляхом вимірювання зміни ємності. Принцип дії заснований на вимірюванні зсуву інерційної маси щодо корпусу і перетворенні його в пропорційний електричний сигнал. Ємнісний метод перетворення вимірюного переміщення є найбільш точним і надійним, тому ємнісні акселерометри набули широкого поширення. Структура ємнісного акселерометра складається з різних пластин, одні з яких є стаціонарними, а інші вільно переміщаються всередині корпусу. Тому, коли буде застосовано прискорення в певному напрямку, маса буде рухатися, а ємність між пластинами і масою змінюватиметься. Ця зміна ємності буде вимірюватися, оброблятися і вона буде відповідати певному значенню прискорення.

Гіроскоп вимірює кутову швидкість за допомогою ефекту Коріоліса. Коли маса рухається в певному напрямку з певною швидкістю, і коли застосовується зовнішня кутова швидкість, як показано зеленою стрілкою (Рисунок 1.12), виникатиме сила, як показано з синьою і червоною стрілкою, що призведе до перпендикулярного зміщення маси. Таким чином, подібний до акселерометра, це

зміщення призведе до зміни ємності, яка буде вимірюватися, оброблятися і відповідатиме певній кутовій швидкості.

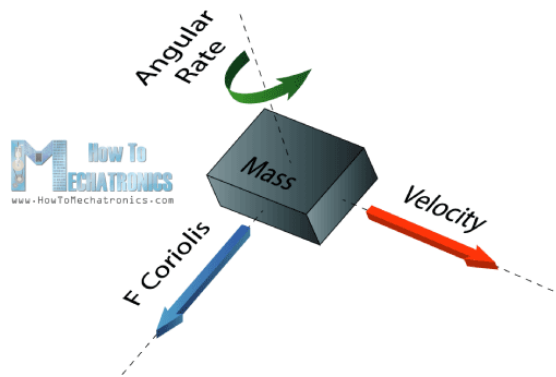


Рисунок 1.12 – Принцип дії

Мікроструктура гіроскопа виглядає приблизно так. Маса, яка постійно рухається або коливається, і коли застосовується зовнішня кутова швидкість, зміщується гнучка частина маси і робить перпендикулярне зміщення[11].

2. Розробка опису лабораторної роботи

2.1 Загальні відомості

Інерціальний вимірювальний модуль (IBM) MAX21105 MinD дозволяє оцінити продуктивність малопотужного цифрового виходу MAX21105. Модуль оснащений монолітним трьох осьовим гіроскопом та трьох осьовим акселерометром виконаними на одній інтегральній схемі.

2.2 Основні технічні дані приладу.

- живлення - напруга 1,8 В; струм 1,9 мА;
- габаритні розміри 3x3x0,83 мм; діапазон робочих температур -40...+85°C;
- параметри гіроскопів - діапазон вимірювання кутової швидкості ± 250 град/с;
- чутливість 120 цифр.знач./град/с; стабільний зсув нуля гіроскопу $\pm 4^\circ/\text{год}$;
- дрейф гіроскопу від зміни температури $0,025^\circ/\text{с}/^\circ\text{C}$;
- похибка нульової кутової швидкості ± 6 град/с;
- випадкове блукання кутової швидкості (ARW) $0,45 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{год}}$;
- нелінійність 0,1% діапазону вимірювання кутової швидкості;
- коефіцієнти перехресного зв'язку $\pm 1\%$;
- дрейф від лінійного прискорення $\pm 0,05$ град/с/g;
- частота вихідних даних 200 Гц;
- параметри акселерометрів – діапазон вимірювання прискорення $\pm 2g$;
- чутливість 15 цифр.знач./mg; залежність зсуву нуля акселерометра від зміни температури $\pm 2,25 \text{ mg}/^\circ\text{C}$;
- коефіцієнти перехресного зв'язку $\pm 1\%$;
- частота вихідних даних 400 Гц.

2.3 Опис випробувального комплексу MinD EVKit

Плата MinD EV Kit (Рисунок 2.1) представляє собою схему на якій розміщений сам MEMS-датчик MAX21105. MinD не вимагає особливої

установки. Він налаштований для роботи на 3.2V з однією подачею для MAX21105. Споживання струму вимірюється за допомогою падіння напруги на резисторі R28 (20Ω). Для більш точної оцінки струму виміряйте резистор і вставте його в відповідного вікна вкладки MinD графічного інтерфейсу. Вставляючи і видаляючи STAMP з PLCC28 розетки, деякі проблеми електричного контакту можуть бути виявлені. Їх можна вирішити, поліпшивши складанням контактів PLCC28.

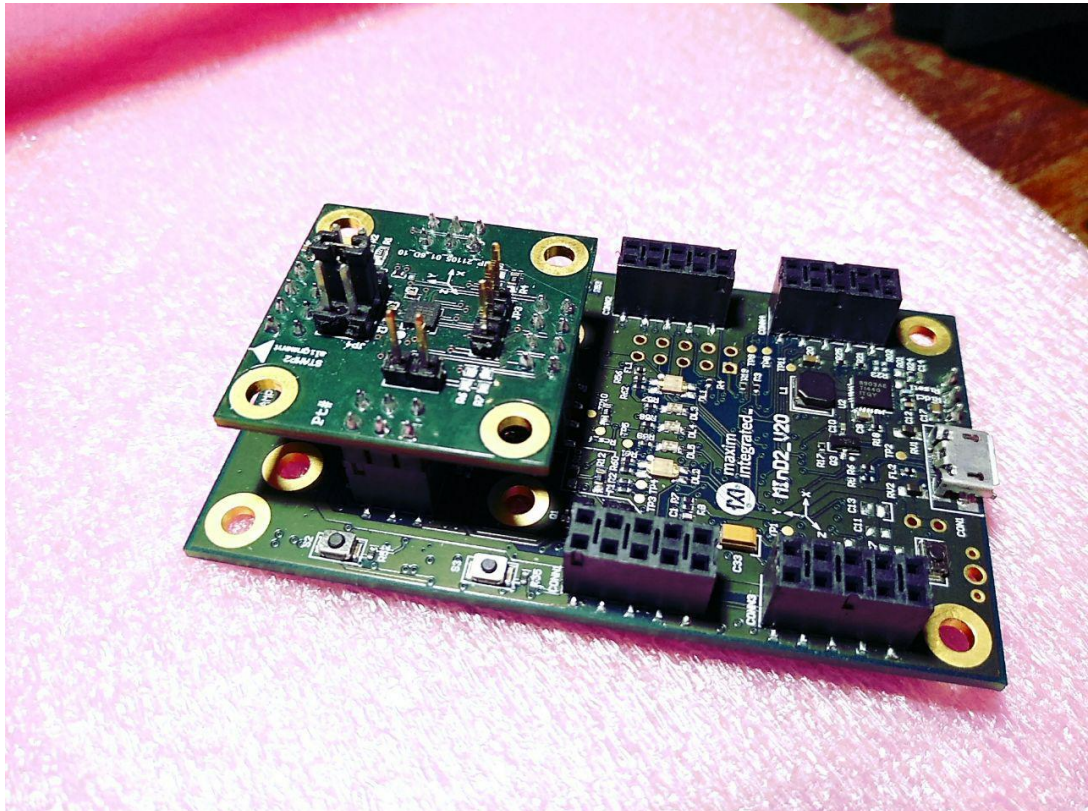


Рисунок 2.1 – Плата MinD EV Kit

MinD містить 4 світлодіоди для інформації про стан системи та кнопку скидання (інші 4 кнопки призначені для майбутнього використання). Показано на рисунку 2.2.

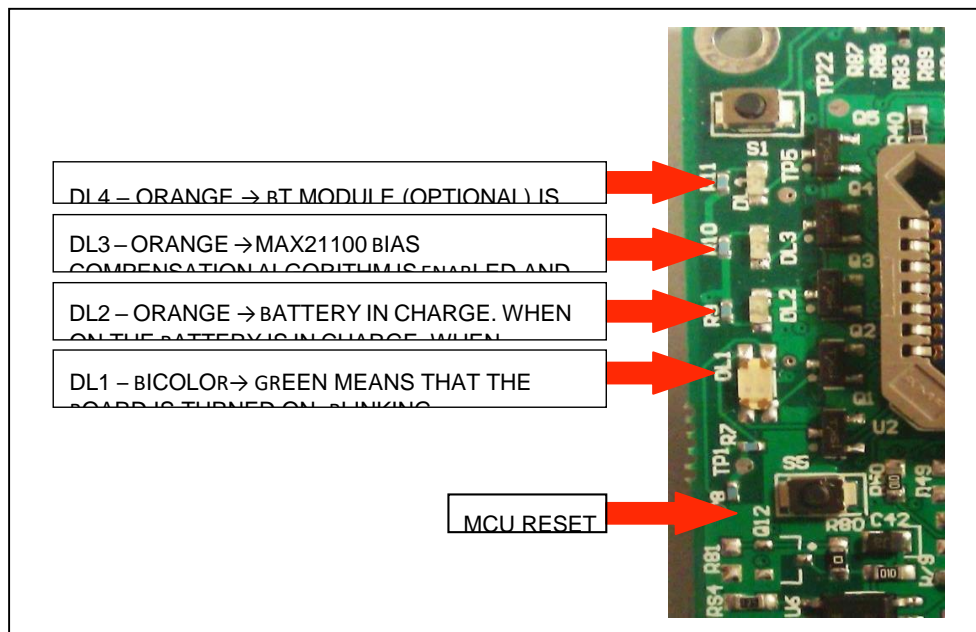


Рисунок 2.2– Схема світлодіодів

Комплект MInD EV забезпечує замкнутий цикл, що складається з апаратного та програмного забезпечення для оцінки IBM за допомогою ПК.

2.4 Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів

Перед тим як знімати данні потрібно скачати з офіційного сайту MEMC-модуля Macsim Integrated програму Evaluation Kit(далі EVKit). Після чого підключаємо датчик до комп'ютера через USB-кабель. Після підключення запускаєм Evaluation Kit. Відкрилося вікно програми(Рисунок 2.3) на якому нічого не відображається.

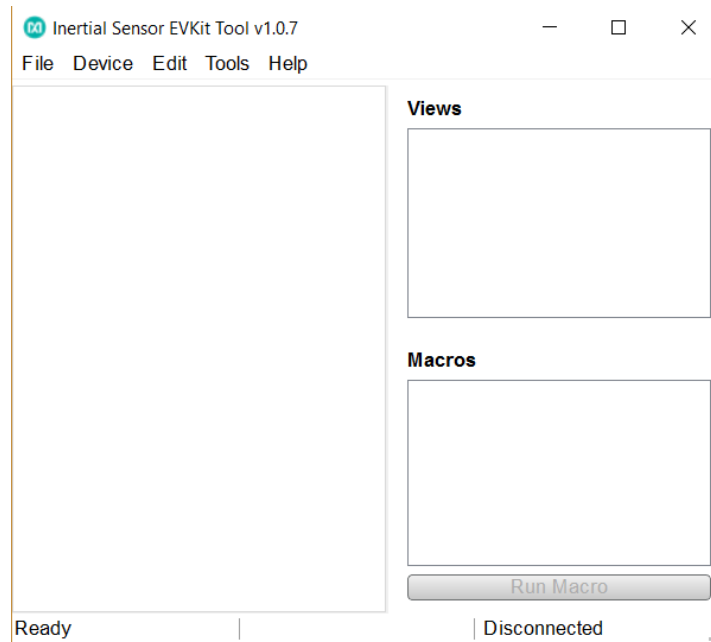


Рисунок 2.3 - Вікно програми

Для цього у вкладці «Device»(Рисунок 2.4) (пристрій) вибираємо розділ «Connect to a New Board» (підключення до нової плати) чи використовуємо комбінацію клавіш «Ctrl+O». Дана процедура підключить наш датчик до програми.

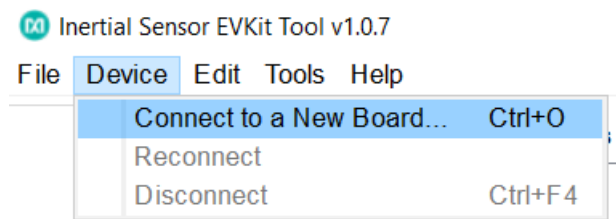


Рисунок 2.4 – Вікно меню Device

У відкритшомуся вікні « Connect to a new board»(Рисунок 2.5) в розділі Communication Interfaces вибираємо MIND2 Boar. Після чого в вікні Selest the Port вибираєм в який з портів підключений наш датчик, після чого жмем Connect. В результаті програма підключила модуль.

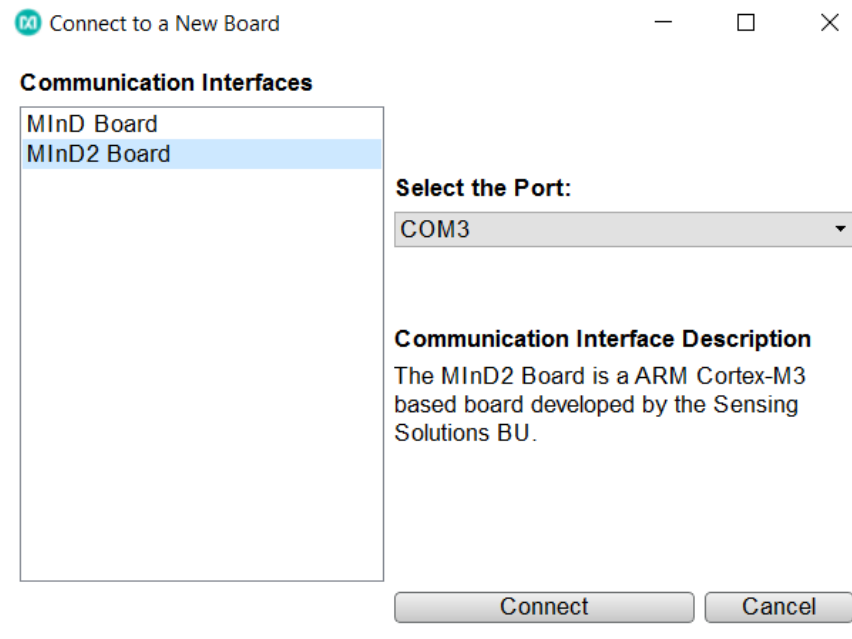


Рисунок 2.5– Вікно Connect to a new board

Тепер підключаємо чутливі елементи. Для цього в блоці «Macros» (Рисунок 2.6) потрібно вибрати пункт «Start Streaming» і натиснути «Run Macro».

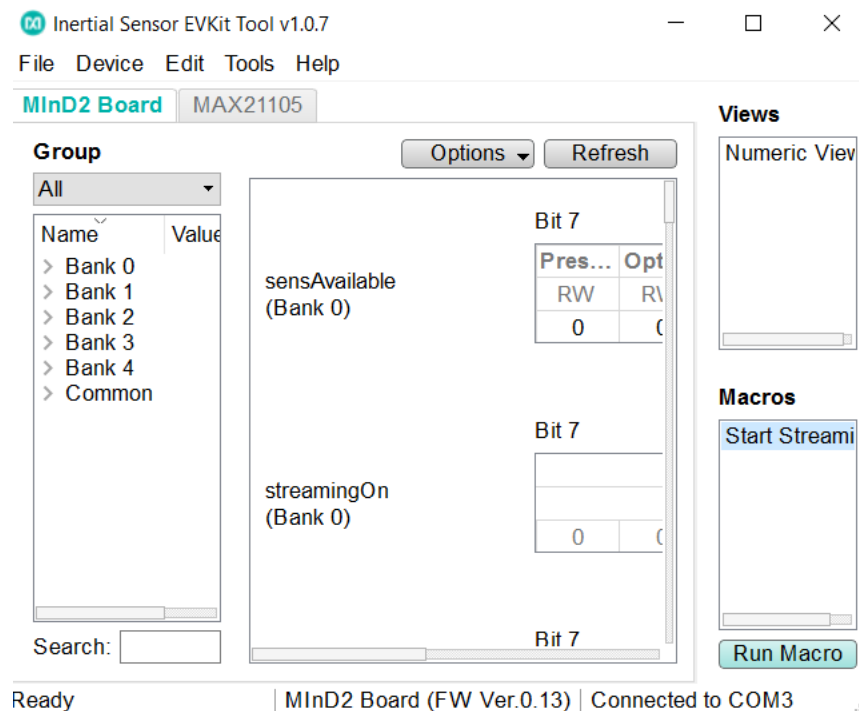


Рисунок 2.6 – Вікно програми з розділом Macros

Тепер відкривши в вікні Views(Рисунок 2.7) пункти «Accelerometer» та «Gyroscope» можна отримати графіки гіроскопу(Рисунок 2.8) та акселерометра(Рисунок 2.9) в реальному часі.

Views

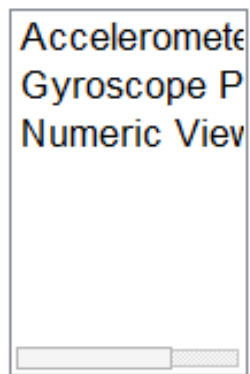


Рисунок 2.7 – Вікно Views

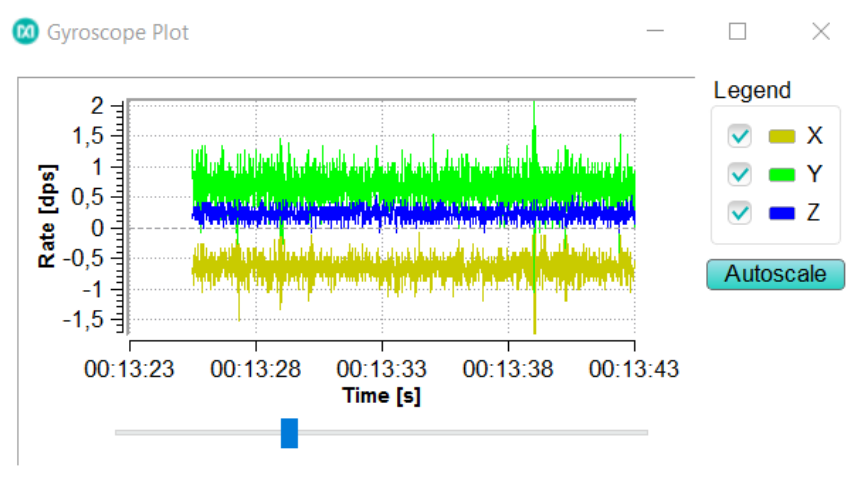


Рисунок 2.8 – Графік вихідних сигналів гіроскопа

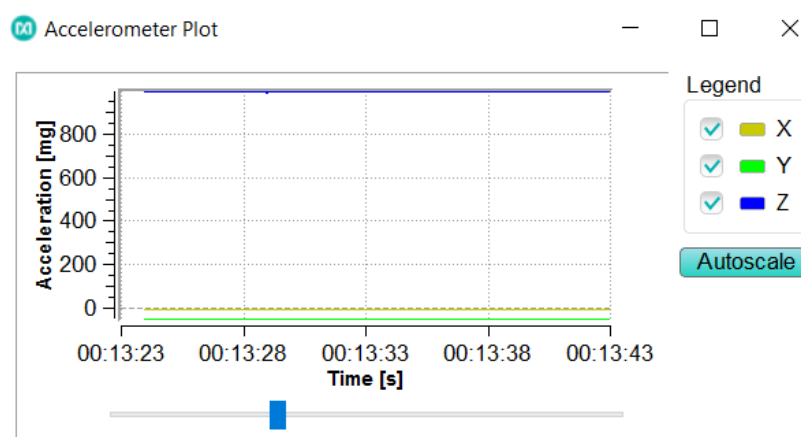


Рисунок 2.9 – Графік вихідних сигналів акселерометра

Так як датчик доволі чутливий , і провівши постукування по платформі де знаходиться модуль бачимо, як графік гіроскопа(Рисунок 2.10) почав змінюватися після додання зовнішнього фактору.

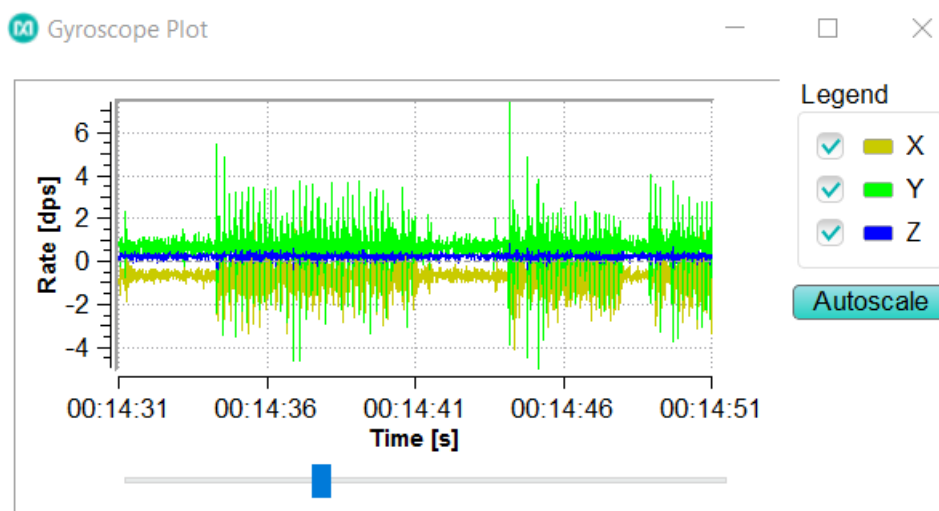


Рисунок 2.10 – Графік вихідних сигналів гіроскопа при впливі зовнішнього фактору

Для того щоб показати зміни в графіку акселерометра(Рисунок 2.11) достатньо його порушити в різні сторони. І відразу помітно як сильно змінився графік.

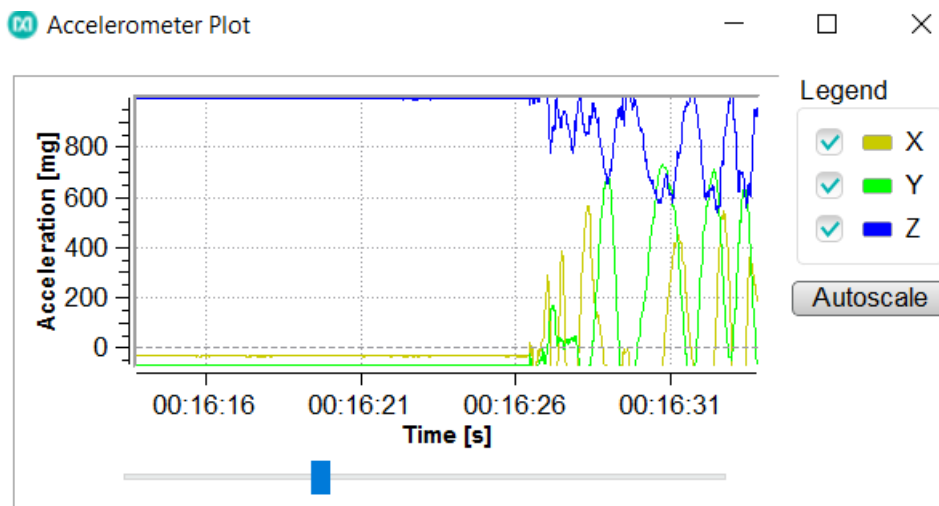


Рисунок 2.11 – Графік вихідних сигналів акселерометра при русі

Перед тим як починати знімати дані, потрібно щоб модуль проробив приблизно 10 хв. для того щоб він «прогрівся» і не було великих похибок. Далі встановлюємо потрібну нам частоту зчитування на акселерометрі та гіроскопі. Для цього переходимо в розділ «MAX21105» і у вікні «Group» вибираємо

«Acceletometar Configuration»(Рисунок 2.12) та «Gyroscoop Configuration»(Рисунок 2.13), і для першого обираємо розділ «ACC_CFG_1» , а для другого «SNS_CFG_2», і встановлюємо потрібні нам частоту. Обовязково жмемо кнопку Refresh для того щоб зміни збереглися.

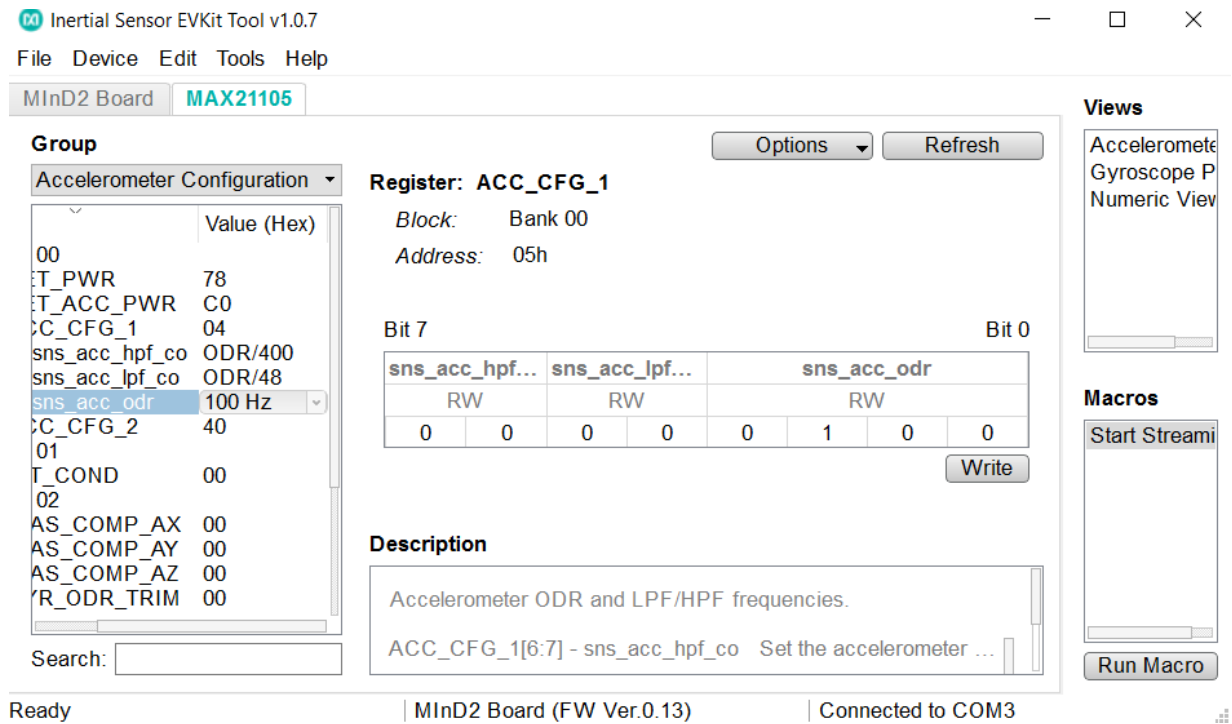


Рисунок 2. 12 – Вікно EVKit з відкритим Acceletometar Configuration

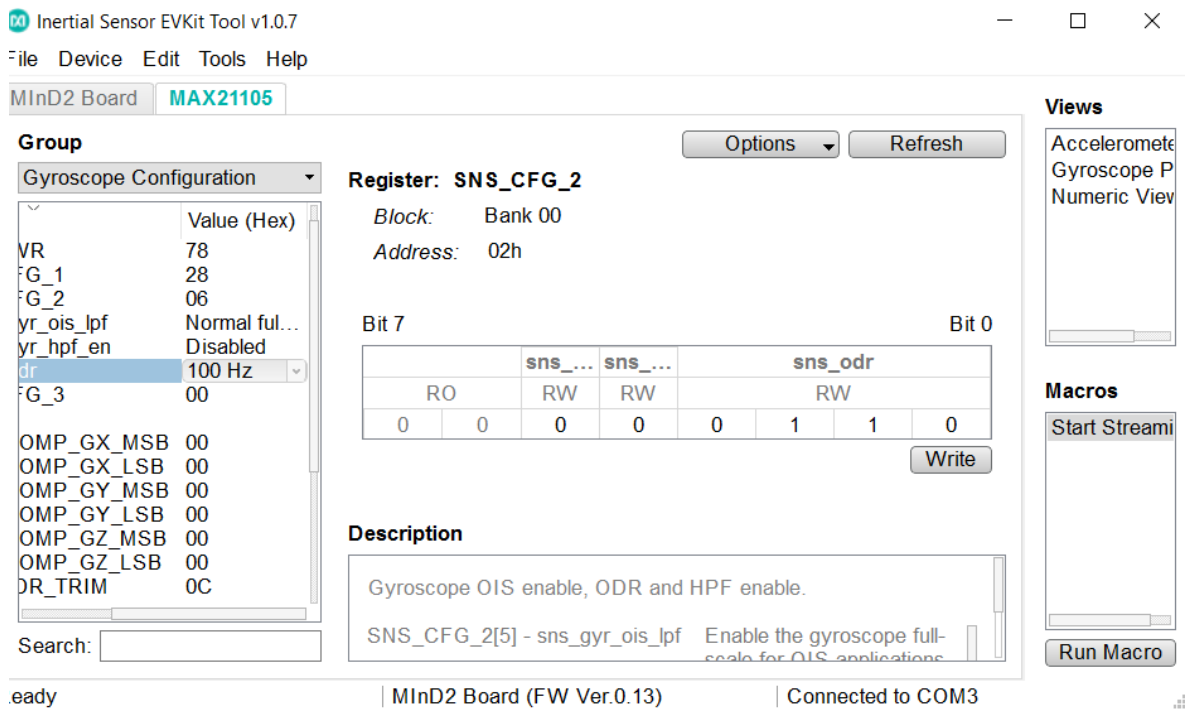


Рисунок 2.13 - Вікно EVKit з відкритим Gyroscoop Configuration

Далі для того щоб почати записувати дані вибираємо меню «Tools»(Рисунок 2.14) і вибираємо розділ «Start Logging».

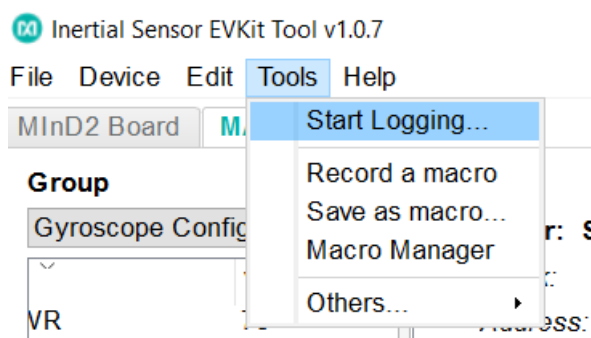


Рисунок 2.14- Вікно Tool

У відкритшомуся вікні Start Logging(Рисунок 2.15) в розділі «Path» вибирається місце зберігання файлу. Нижче в розділі «Filename» записується ім'я файлу зі знятими даними. В розділі «Streaming Data» вибираються показники для зняття. В вікні «Available Streaming Data» вибираються потрібні типи даних. Для того щоб іменню з них зчитувалися дані, їх переносять в вікно «Selected Streaming Data» нажавши «>>». Після чого для початку запуску даних жмемо кнопку «Apply».

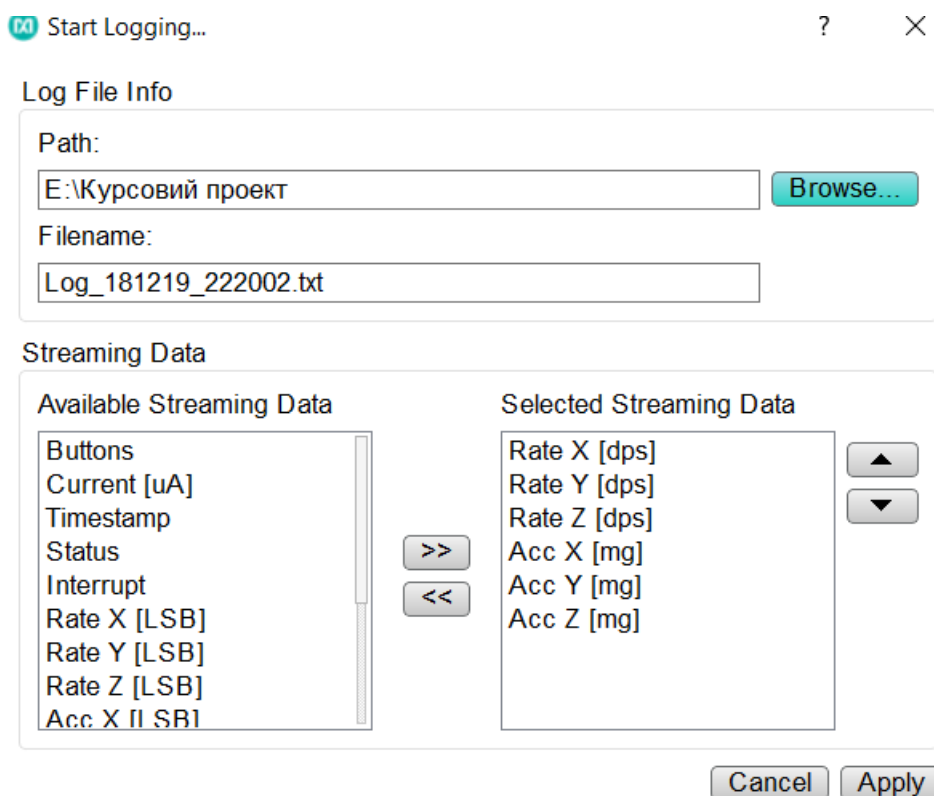


Рисунок 2.15 – Вікно Start Logging

Після запуску процесу зчитування даних слід мінімізувати вплив на датчик зовнішніх факторів, таких як постукування, удари, для того щоб не було похибок вимірювання. Після того як пройшов потрібний період часу зупиняємо запис. Для цього жмем кнопку «Stop Logging»(Рисунок 2.16) в верхньому правому куті програми.

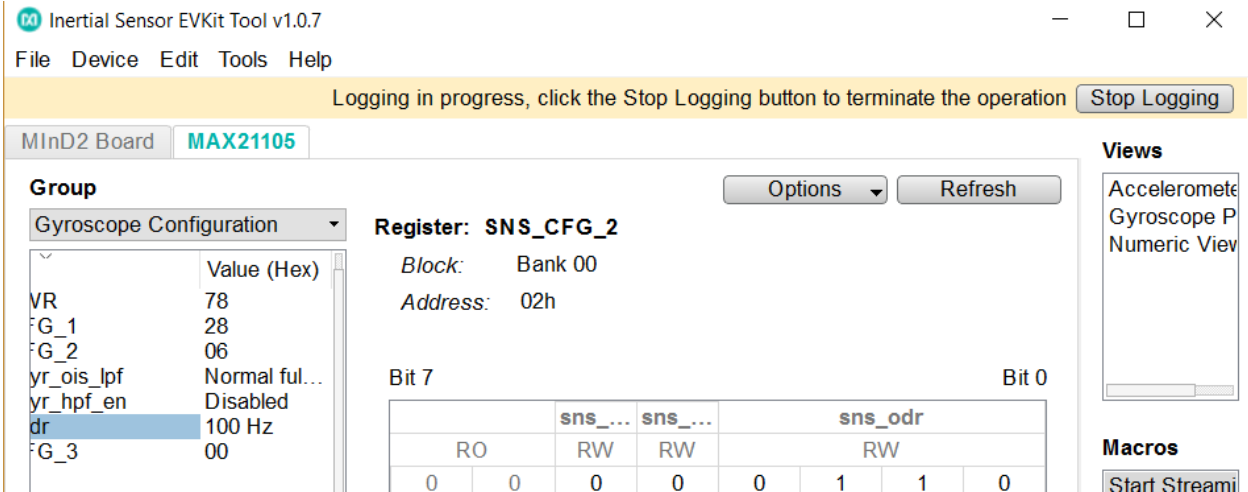


Рисунок 2.16 – Віно EVKit з кнопкою Stop Logging

Отриманий файл(Рисунок 2.17) з даними буде виглядати наступним чином.

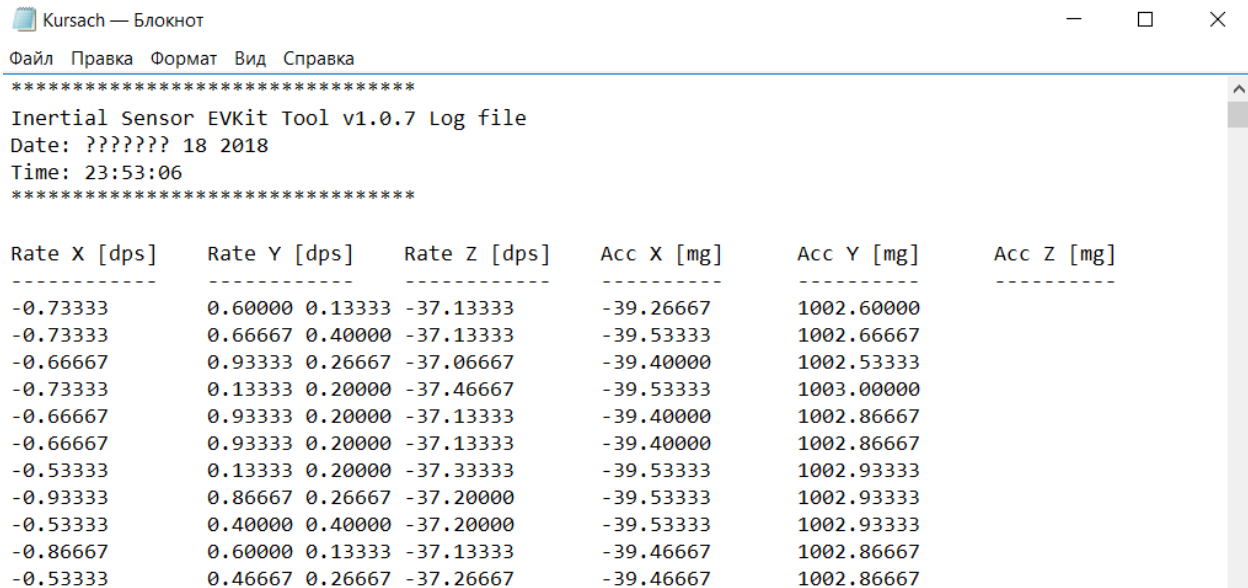


Рисунок 2.17 – Файл з збереженими даними

3. Розробка методики зберігання та обробки даних експериментів на прикладі аналізу варіацій Аллана для гіроскопів та акселерометрів

3.1 Варіації Аллана

Дисперсія Аллана (AVAR), також відома як дисперсія з двома зразками, є показником стабільності частоти в годинниках, осциляторах і підсилювачах. Він названий на честь Давида У. Аллана. Це виражається математично як

$$\sigma_y^2(\tau)$$

Відхилення Аллана (ADEV) - квадратний корінь дисперсії Аллана. Він також відомий як сигма-тау і виражений математично

$$\sigma_y(\tau)$$

Дисперсія М-вибірки є мірою стабільності частоти з використанням М-проб, час Т між показниками і часом спостереження. Дисперсія М-вибірки виражається як

$$\sigma_y^2(M, T, \tau)$$

Дисперсія Аллана призначена для оцінки стабільності внаслідок шумових процесів, а не систематичних помилок або недоліків, таких як дрейф частоти або температурні ефекти. Дисперсія Аллана і відхилення Аллана описують стабільність частоти, тобто стабільність у частоті. Нижче наведено розділ "Інтерпретація вартості".

Існують також різні адаптації або зміни дисперсії Аллана, зокрема модифікована дисперсія Allan MAVAR або MVAR, сумарна дисперсія і дисперсія Адамара. Також існують варіанти тимчасової стабільності, такі як відхилення часу TDEV або дисперсія часу TVAR. Дисперсія Аллана і її варіанти

виявилися корисними за межами часового контролю і є набором поліпшених статистичних інструментів, які використовуються, коли шумові процеси не є безумовно стабільними, отже, існує похідна.

Загальна дисперсія М-вибірки залишається важливою, оскільки вона дає можливість мертвого часу в вимірах і функції зсуву дозволяє конвертувати в значення дисперсії Аллана. Тим не менш, для більшості додатків особливий випадок 2-вибірки або "дисперсії Аллана" має найбільший інтерес[12].

3.1.1 Визначення

Дисперсія М-вибірки

Варіація Аллана визначається як:

$$\sigma_x^2(M, T, \tau) = \frac{1}{M-1} \left\{ \left[\sum_{i=0}^{M-1} \left[\frac{x(iT + \tau) - x(iT)}{\tau} \right]^2 \right] - \frac{1}{M} \left[\sum_{i=0}^{M-1} \frac{x(iT + \tau) - x(iT)}{\tau} \right]^2 \right\} \quad (3.1)$$

Або із середньою частотою часовий(временной) ряд:

$$\sigma_x^2(M, T, \tau) = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} y_i^2 - \frac{1}{M} \left[\sum_{i=0}^{M-1} y_i \right]^2 \right\} \quad (3.2)$$

Де W – число частотних зразків(виборок)- це час між кожною частотною вибіркою і довжиною кожної оцінки частоти[12].

3.1.1 Дисперсія Аллана

Дисперсія Аллана визначається як:

$$\sigma_y^2(\tau) = \langle \sigma_y^2(2, \tau, \tau) \rangle \quad (3.3)$$

Яка зручно виражається як :

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle = \frac{1}{2\tau^2} \langle (x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n)^2 \rangle \quad (3.4)$$

де - період спостереження, - це n-й середній часток за час спостереження. Зразки беруться без затримання між ними, що досягається шляхом випуску.

$$T = \tau$$

Відхилення Аллана так само як і для стандартного відхилення і дисперсії, визначається як квадратний корінь з дисперсії Аллана[12]:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)} \quad (3.5)$$

3.1.2 Потужність шуму

Дисперсія Аллана буде по-різному розглядати різні типи шумових шумів, зручно дозволяючи їх ідентифікувати та оцінювати їх міцність. Як правило, ширина вимірювальної системи (висока частота кута) позначається fH. Нижче наведена табличка шумів Таблица 3.1.

Потужність рівня шуму	Нахил фазового шуму	Нахил частотно шуму	Коефіцієнт потужності	Фазовий шум	Дисперсія Аллана	Відхилення Аллана
модуляція білої фази (МБФ)	$f^0 = 1$	f^2	h_2	$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi)^2} h_2$	$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3f_H}{4\pi^2\tau^2} h_2$	$\sigma_y(\tau) = \frac{\sqrt{3f_H}}{2\pi\tau} \sqrt{h_2}$
фазова модуляція мерехтіння (ФММ)	f^{-1}	$f^1 = f$	h_1	$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi)^2 f} h_1$	$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3[\gamma + \ln(2\pi f_H \tau)] - \ln 2}{4\pi^2\tau^2} h_1$	$\sigma_t(\tau) = \frac{\sqrt{3[\gamma + \ln(2\pi f_H \tau)] - \ln 2}}{2\pi\tau} \sqrt{h_1}$
Модуляція білої частоти (МБЧ)	f^{-2}	$f^0 = 1$	h_0	$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi)^2 f^2} h_0$	$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau} h_0$	$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\tau}} \sqrt{h_0}$
частотна модуляція мерехтіння (ЧММ)	f^{-3}	f^{-1}	h_{-1}	$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi)^2 f^3} h_{-1}$	$\sigma_y^2(\tau) = 2 \ln(2) h_{-1}$	$\sigma_y(\tau) = \sqrt{2 \ln(2)} \sqrt{h_{-1}}$
частотна модуляція випадкової ходьби (ЧМВХ)	f^{-4}	f^{-2}	h_{-2}	$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi)^2 f^4} h_{-2}$	$\sigma_y^2(\tau) = \frac{2\pi^2\tau}{3} h_{-2}$	$\sigma_y(\tau) = \frac{\pi\sqrt{2\tau}}{\sqrt{3}} \sqrt{h_{-2}}$

Таблица 3.1 – Таблица шумів

Дисперсія Аллана не може розрізняти МБФ і ФММ, але здатна вирішувати інші типи шумів закону. Для того, щоб розрізняти МБФ і ФММ, необхідно використовувати модифіковану дисперсію Аллана.

Наведені вище формули припускають, що:

$$\tau \gg \frac{1}{2\pi f_H}$$

Таким чином, пропускна здатність часу спостереження набагато нижче, ніж пропускна здатність інструментів. Коли ця умова не виконується, всі форми шуму залежать від пропускної здатності приладів[12].

3.1.3 α - μ відображення

Детальне відображення фазової модуляції форми

$$S_x(f) = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^{\alpha-2} = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^\beta \quad (3.6)$$

де

$$\beta = \alpha - 2$$

або частотна модуляція форми

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha \quad (3.7)$$

в дисперсію Аллана:

$$\sigma_y^2(\tau) = K_\alpha h_\alpha \tau^\mu \quad (3.8)$$

можуть бути значно спрощені, забезпечуючи відображення між α і μ . Для зручності також представлено зіставлення між α і K_α (Таблиця 3.2)[12]:

α	β	μ	K_α
-2	-4	1	$\frac{2\pi^2}{3}$
-1	-3	0	$2 \ln 2$
0	-2	-1	$\frac{1}{2}$
1	-1	-2	$\frac{3[\gamma + \ln(2\pi f_H \tau)] - \ln 2}{4\pi^2}$
2	0	-2	$\frac{3f_H}{4\pi^2}$

Таблиця 3.2 – Фазові модуляції

3.1.4 Властивості фільтра часу і частоти

При аналізі властивостей дисперсії Аллана виявилося корисним розглянути властивості фільтра на частоті нормалізації. Починаючи з визначення для дисперсії Аллана відхилення для

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \right\rangle \quad (3.9)$$

де

$$\bar{y}_i = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau y(i\tau + t) dt$$

Замінивши тимчасові ряди з варіантом, перетвореним Фур'є, дисперсія Аллана може бути виражена в частотній області як

$$\sigma_y^2(\tau) = \int_0^\infty S_y(f) \frac{2 \sin^4 \pi \tau f}{(\pi \tau f)^2} df \quad (3.10)$$

Таким чином, передаточна функція для дисперсії Аллана набуває вигляд[12]:

$$|H_A(f)|^2 = \frac{2\sin^4 \pi \tau f}{(\pi \tau f)^2} \quad (3.11)$$

3.2 Розрахунок варіацій Аллана для Matlab

Для опису шумових характеристик гіроскопа і акселерометра використовують варіації Аллана. В результаті досліджень отримаємо наступні данні [13]:

$$x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, \dots, x_i, \dots, x_n$$

Оцінку дисперсії можна вичислити по формулі:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.12)$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(x_{i-1} + x_i)$$

Для двох сусідніх значень x_{i-1}, x_i незміщена оцінка дисперсії вираховується по формулі:

$$\begin{aligned} \sigma_{i-1,i}^2 &= \frac{1}{2-1} \left[(x_{i-1} - \bar{x})^2 + (x_i - \bar{x})^2 \right] = x_{i-1}^2 - 2\bar{x}x_{i-1} + \bar{x}^2 + x_i^2 - 2\bar{x}x_i + \bar{x}^2 = \\ &= x_{i-1}^2 - 2\bar{x}(x_{i-1} + x_i) + 2\bar{x}^2 + x_i^2 = \dots = \frac{1}{2}(x_{i-1} + x_i)^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для масиву N вимірювань варіацій Аллана вираховуються дві групи $x_i (M)$ послідовних вимірювань:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^K \left[\bar{x}_{i-1}(M) - \bar{x}_i(M) \right]^2 \quad (3.14)$$

де $K = \frac{N}{M}$, M розмір групи, $\bar{x}_i(M)$ - середнє значення групи.

Далі дисперсію Аллана потрібно ввести в Matlab (дивитися Додаток А) для подальшого опрацювання.

3.3 Розрахунок похибок

3.3.1 Випадкове блукання кута

Характерний кутовий прохід характеризується спектром білого шуму на виході гіроскопа. Представляє собою формулу

Розраховується за формулою:

$$S_w(f) = N^2 \quad (3.15)$$

де N – коефіцієнт випадкового кута

Підставляючи у вихідне рівняння спектральної щільності потужності і виконуючи інтегрування отримуємо:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{N^2}{\tau} \quad (3.16)$$

Наведене вище рівняння являє собою лінію з нахилом $-1/2$ при нанесенні на логаритмічний масштаб. Дивитися додаток Б.

Нижче наведені графіки варіацій Аллана з знайденим випадковим блуканням кута (Рисунок 3.1-3.6).

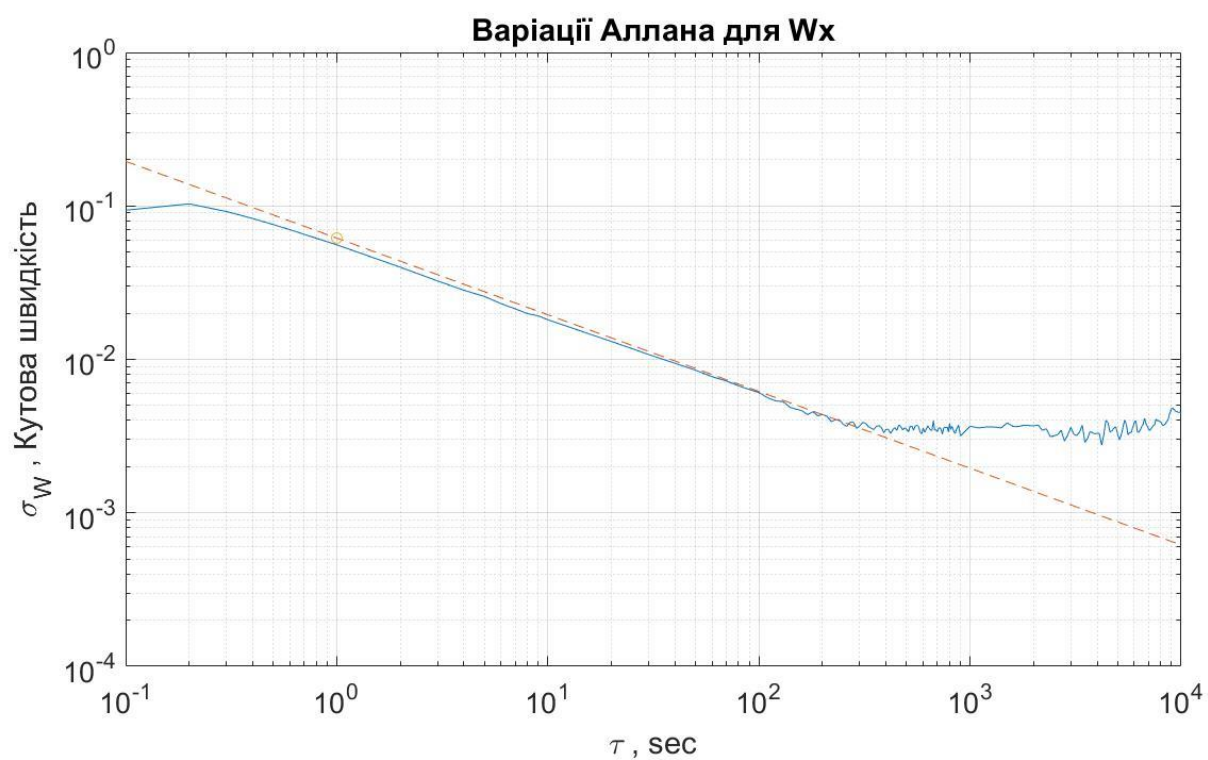


Рисунок 3.1 – Варіації Аллана для Wx з випадковим блуканням кута

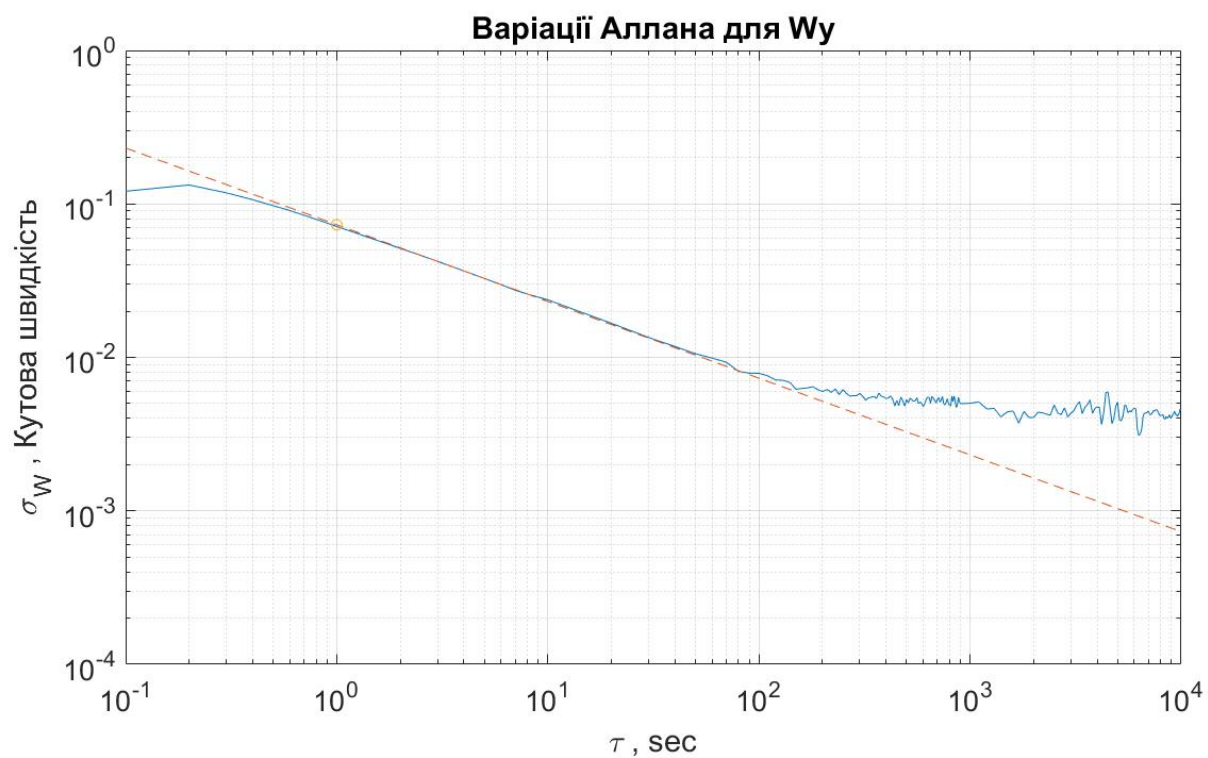


Рисунок 3.2 – Варіації Аллана для Wy з випадковим блуканням кута

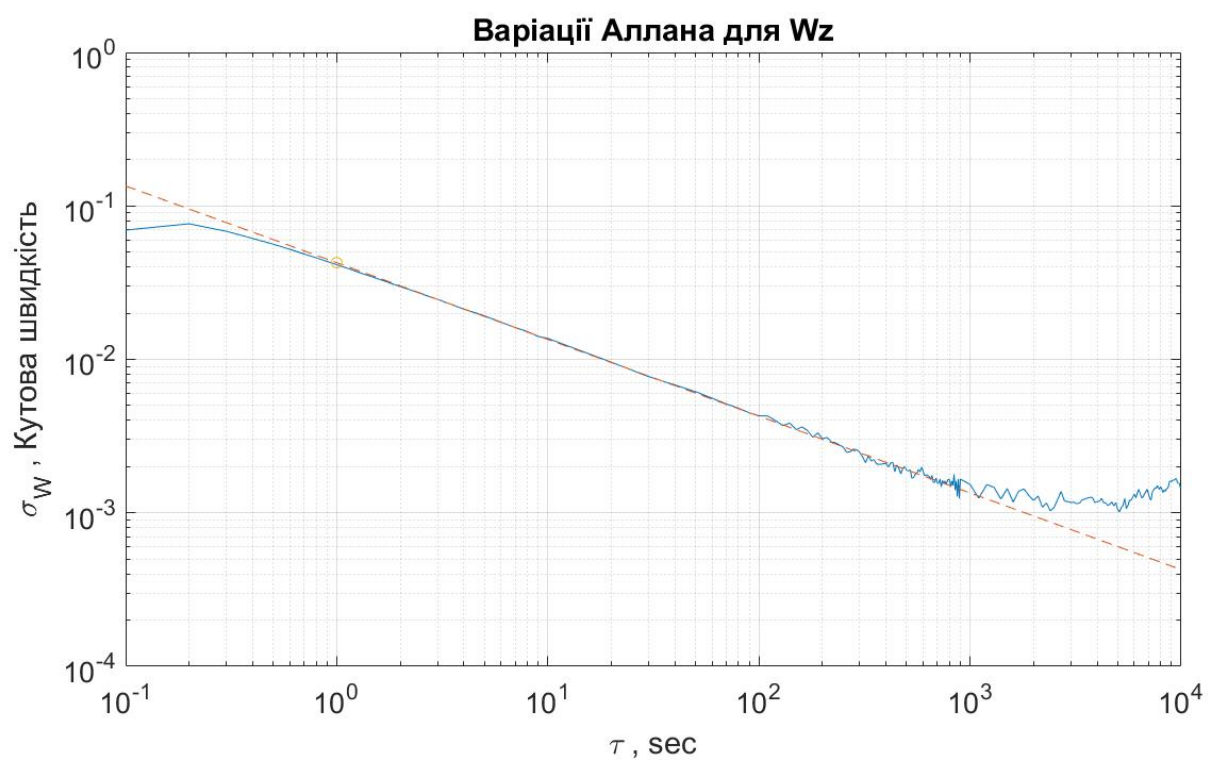


Рисунок 3.3 – Варіації Аллана для W_z з випадковим блуканням кута

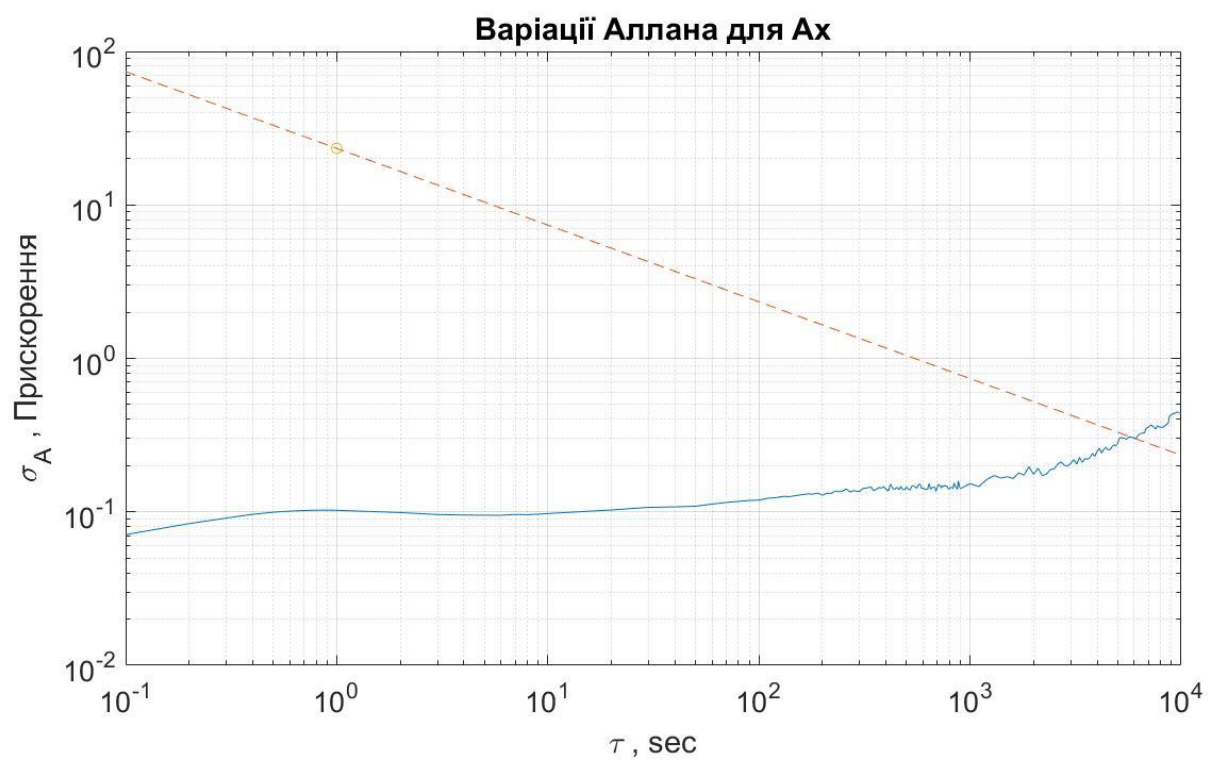


Рисунок 3.4 – Варіації Аллана для A_x з випадковим блуканням кута

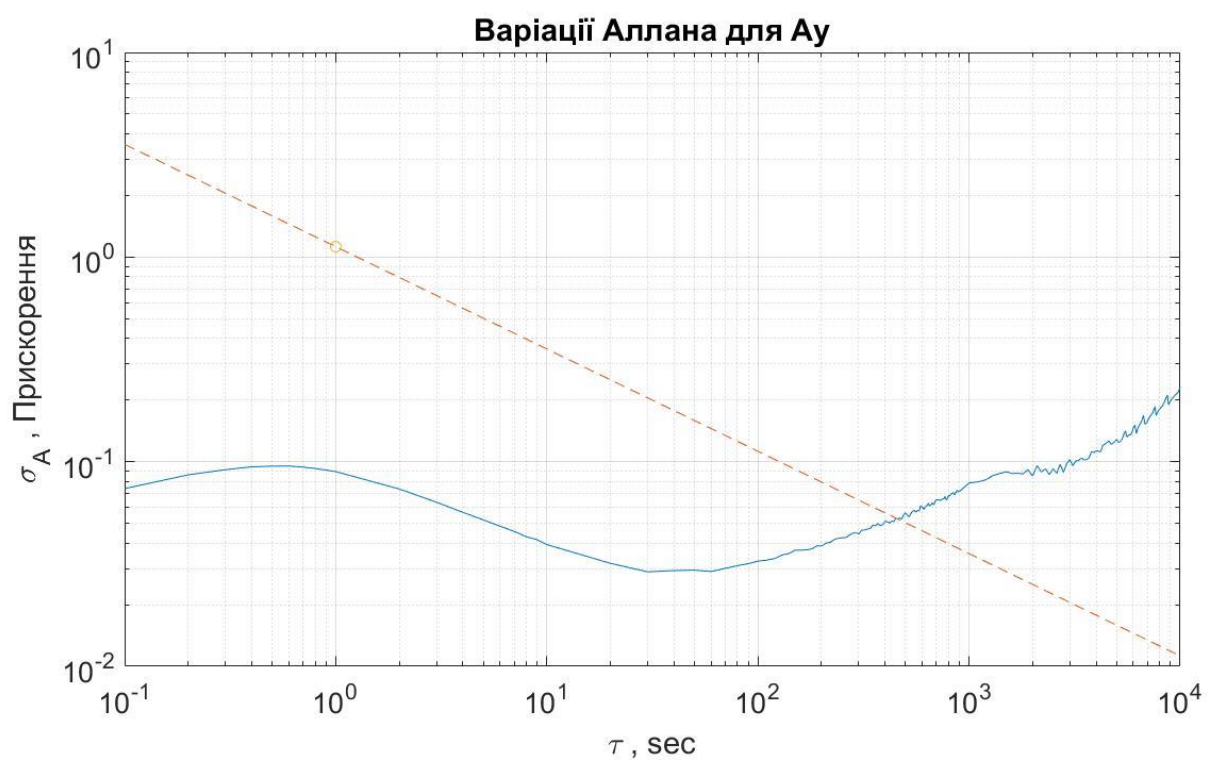


Рисунок 3.5 – Варіації Аллана для A_y з випадковим блуканням кута

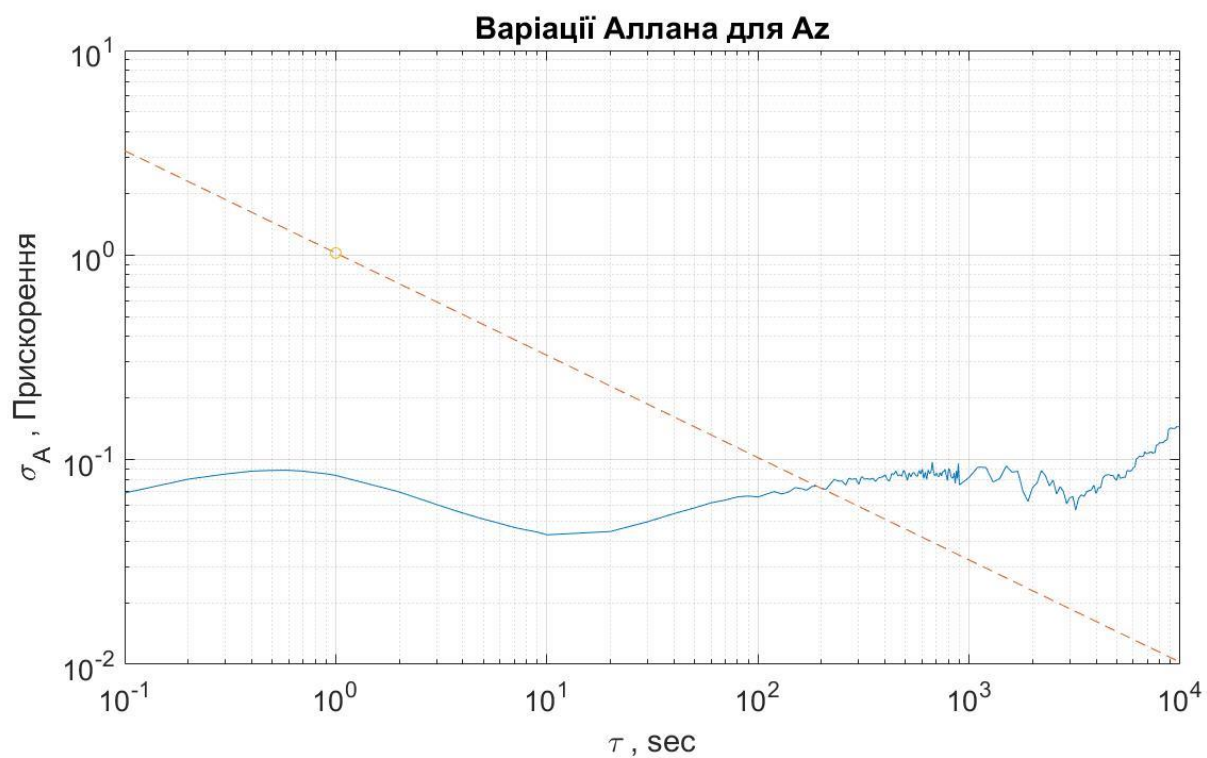


Рисунок 3.6 – Варіації Аллана для A_z з випадковим блуканням кута

3.3.2 Випадкове блукання швидкості

Випадкове блукання швидкості характеризується спектром червоного шуму (броунівський шум) виходу гіроскопа. Має вигляд:

$$S_{\omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{f^2} \quad (3.17)$$

де K – коефіцієнт випадкового блукання

Підставляючи у вихідне рівняння спектральної щільності потужності і виконуючи інтегрування отримуємо :

$$\sigma^2(\tau) = \frac{K^2 \tau}{3} \quad (3.18)$$

Наведене вище рівняння являє собою лінію з нахилом $1/2$ при нанесенні на логаритмічний масштаб. Дивитися Додаток В.

Нижче наведені графіки варіацій Аллана з знайденим випадковим блуканням кута (Рисунок 3.7-3.12).

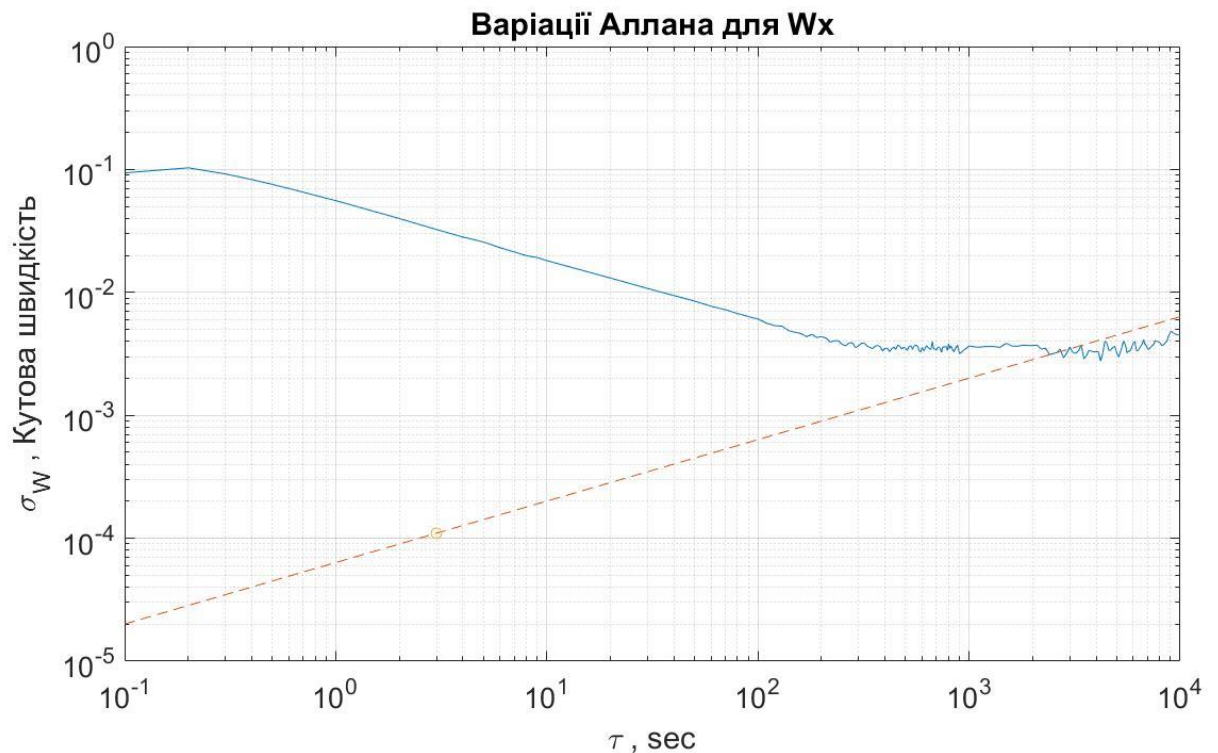


Рисунок 3.7 – Варіації Аллана для W_x з випадковим блуканням швидкості

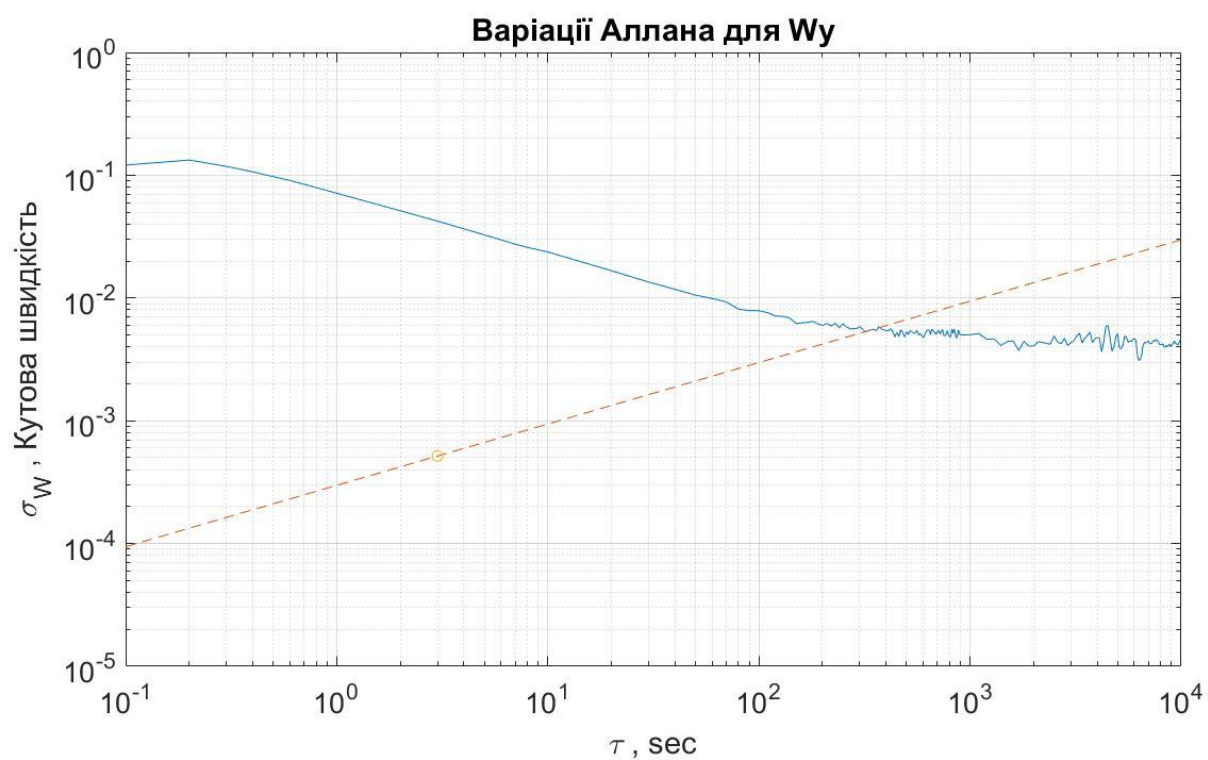


Рисунок 3.8 – Варіації Аллана для W_y з випадковим блуканням швидкості

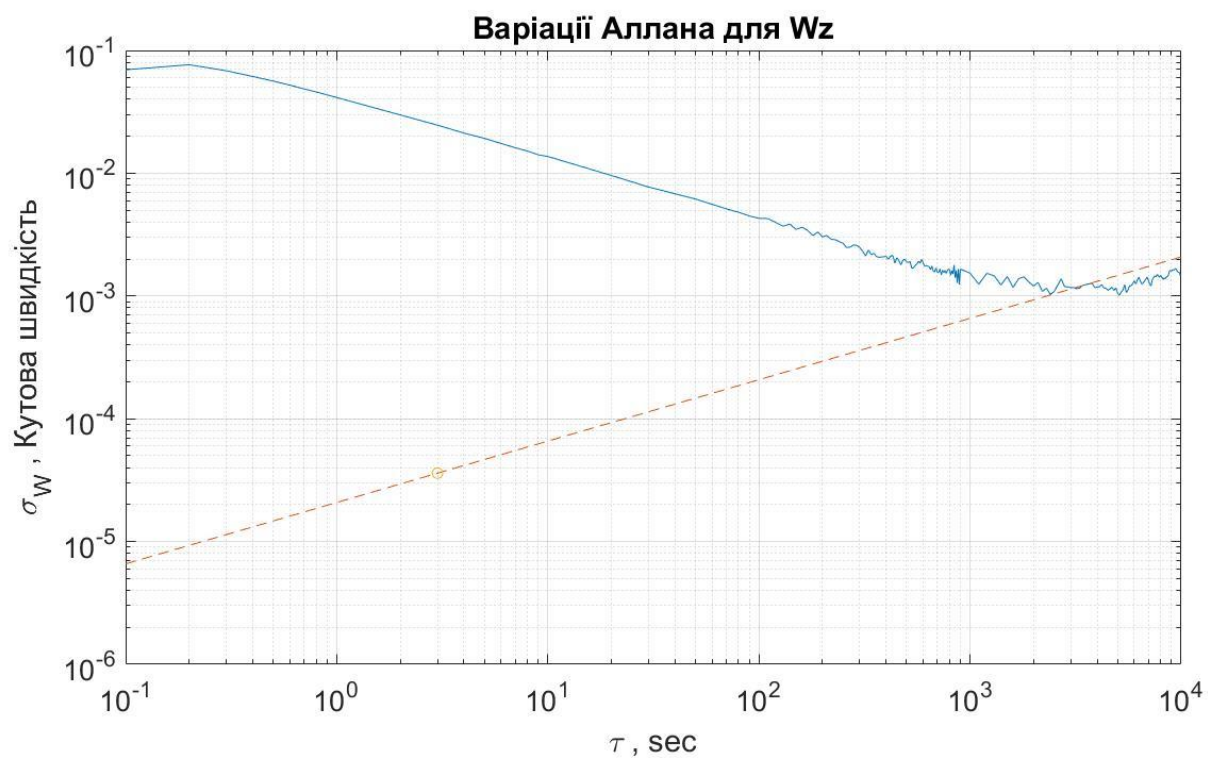


Рисунок 3.9 – Варіації Аллана для W_z з випадковим блуканням швидкості

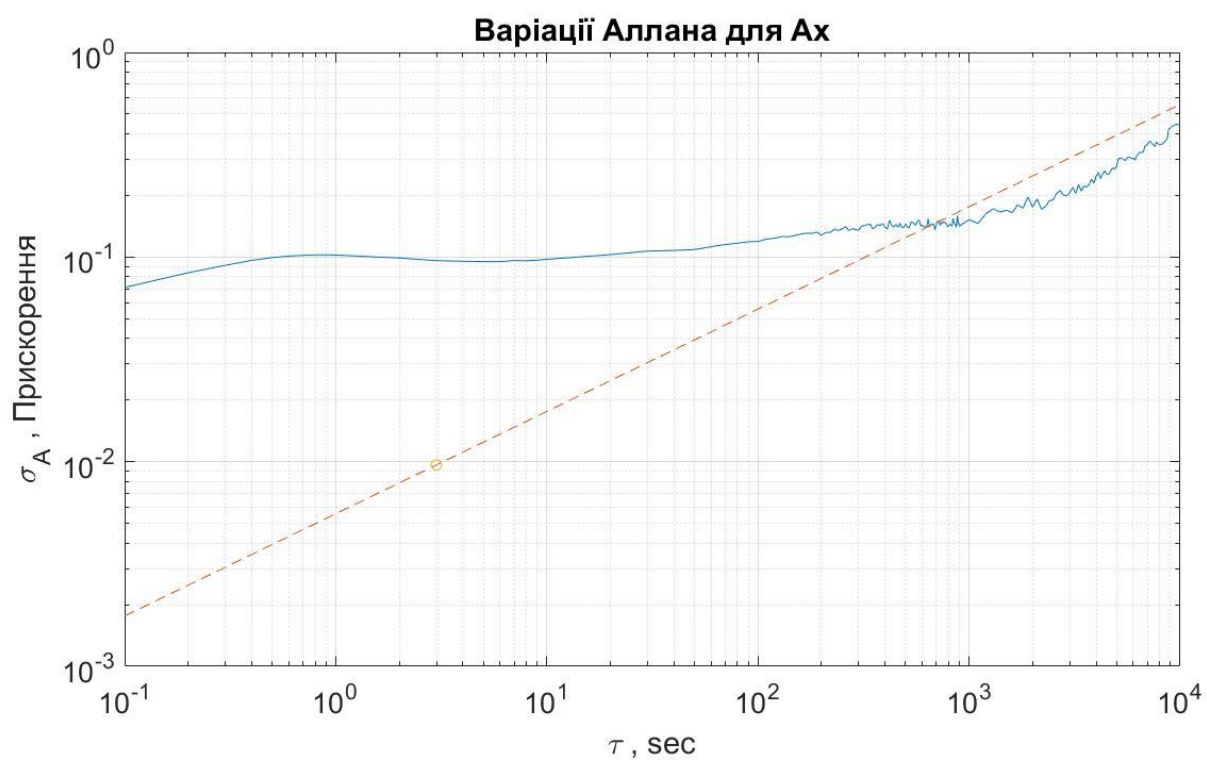


Рисунок 3.10 – Варіації Аллана для A_x з випадковим блуканням швидкості

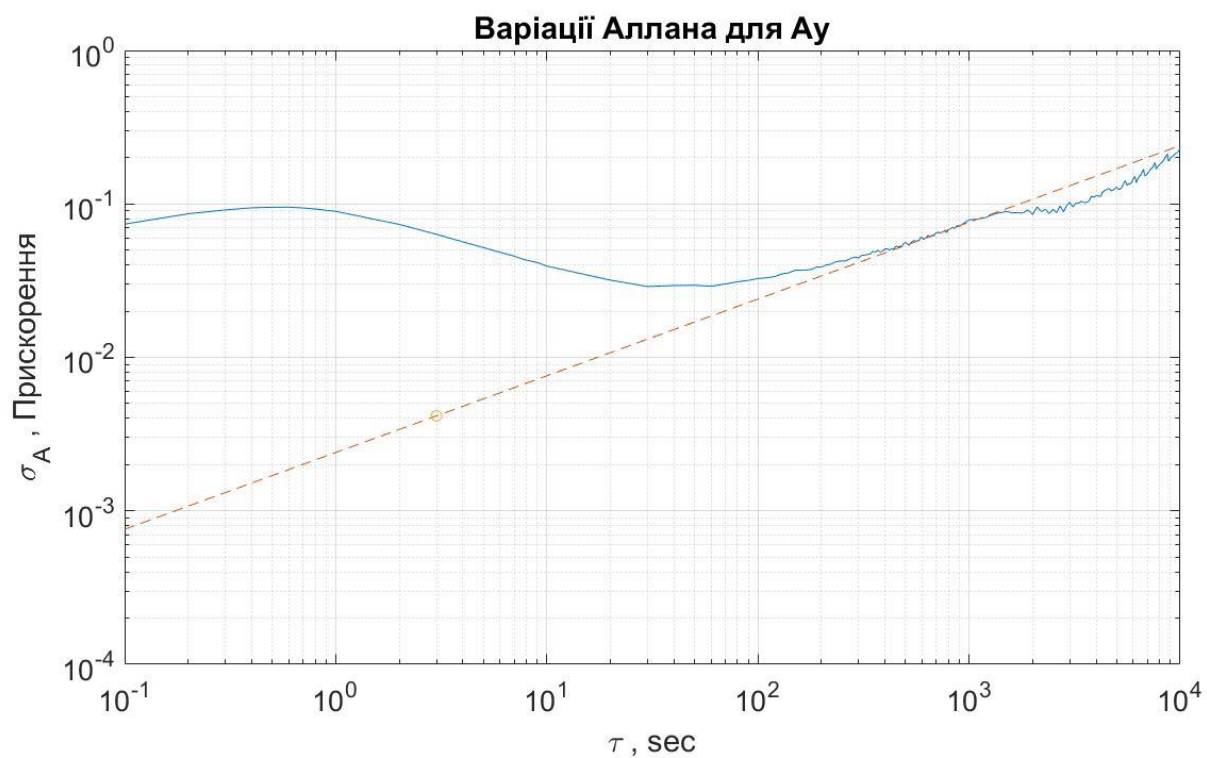


Рисунок 3.11 – Варіації Аллана для A_y з випадковим блуканням швидкості

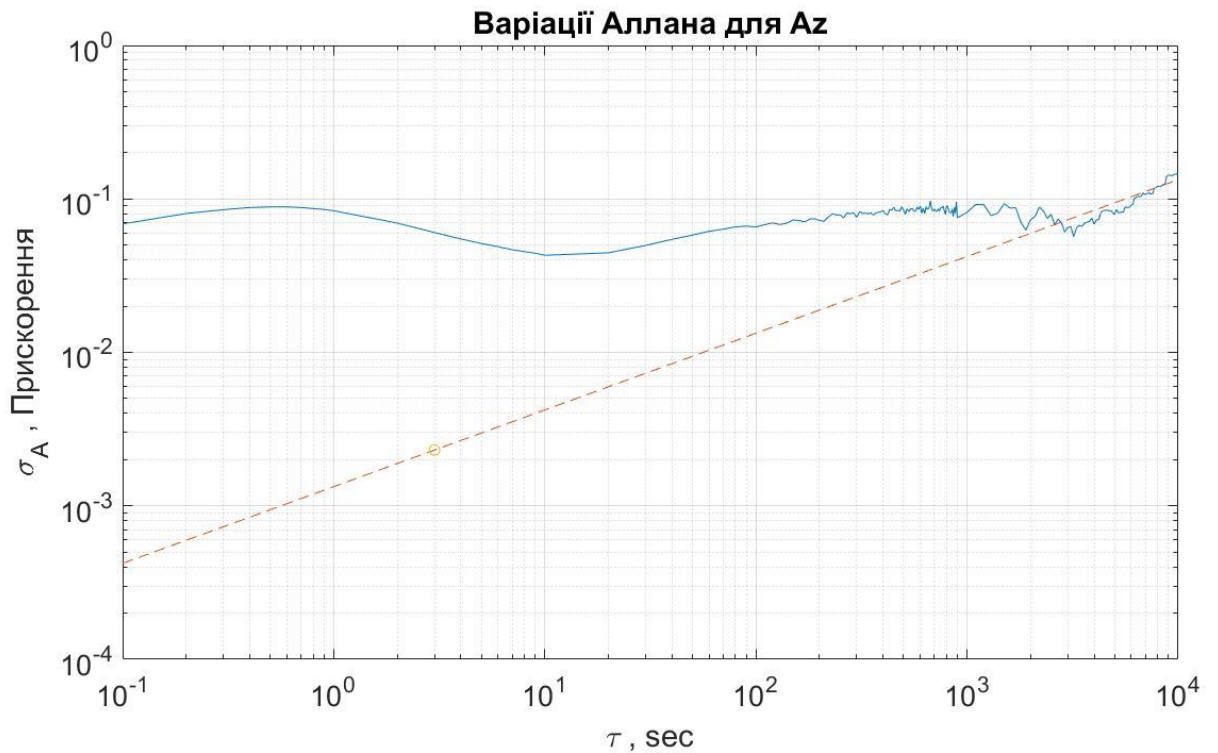


Рисунок 3.12 – Варіації Аллана для A_z з випадковим блуканням швидкості

3.3.3 Нестабільність зміщення нуля

Нестабільність зміщення нуля характеризується спектром рожевого шуму (шуму мерехтіння) виходу гіроскопа, спектральної щільності потужності має вигляд:

$$S_{\omega}(f) = \begin{cases} \frac{B^2}{2\pi} \frac{1}{f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f > f_0 \end{cases} \quad (3.19)$$

де B - коефіцієнт нестабільності зсуву, f_0 - частота відсікання

Підставляючи у вихідне рівняння спектральної щільності потужності і виконуючи інтегрування отримо:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{2B^2}{\pi} \left[\ln 2 + -\frac{\sin^3 x}{2x^2} (\sin x - 4x \cos x) + Ci(2x) - Ci(4x) \right] \quad (3.20)$$

де $x = \pi f_0 \tau$, Ci - косинус-інтегральна функція

Коли τ набагато довше, ніж інверсна частота зрізу, рівняння спектральної щільності потужності набуває вигляду:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{2B^2}{\pi} \ln 2 \quad (3.21)$$

Наведене вище рівняння являє собою лінію з нахилом 0 при нанесенні на логаритмічний масштаб. Дивитися додаток Г.

Нижче наведені графіки варіацій Аллана з знайденим випадковим блуканням кута (Рисунок 3.13-3.18)

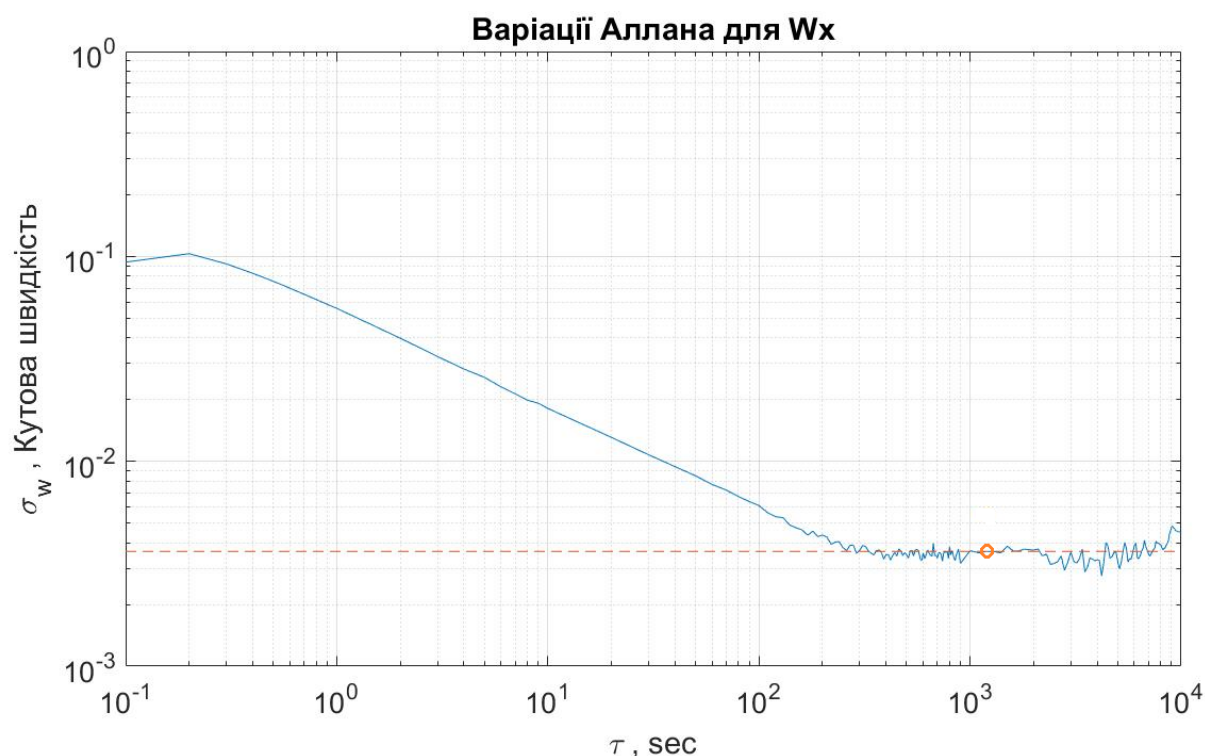


Рисунок 3.13 – Варіації Аллана для Wx з нестабільним зміщенням нуля

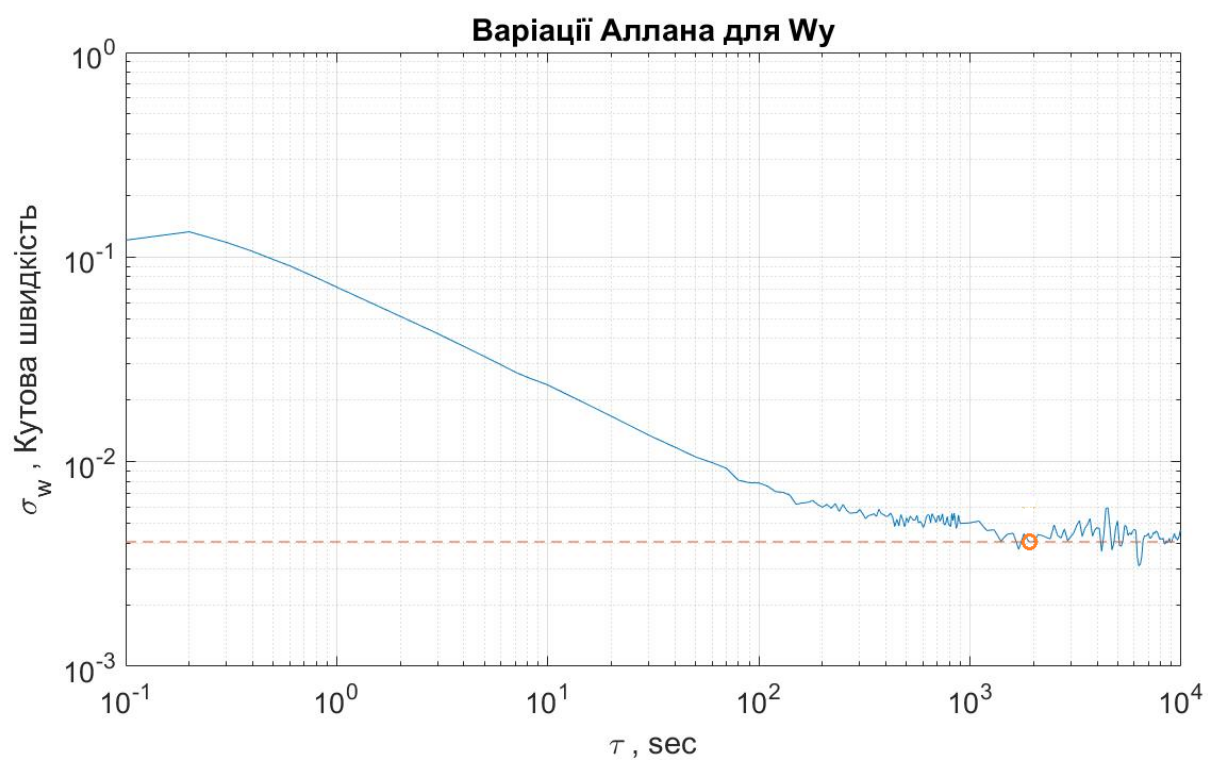


Рисунок 3.14 – Варіації Аллана для Wy з нестабільним зміщенням нуля

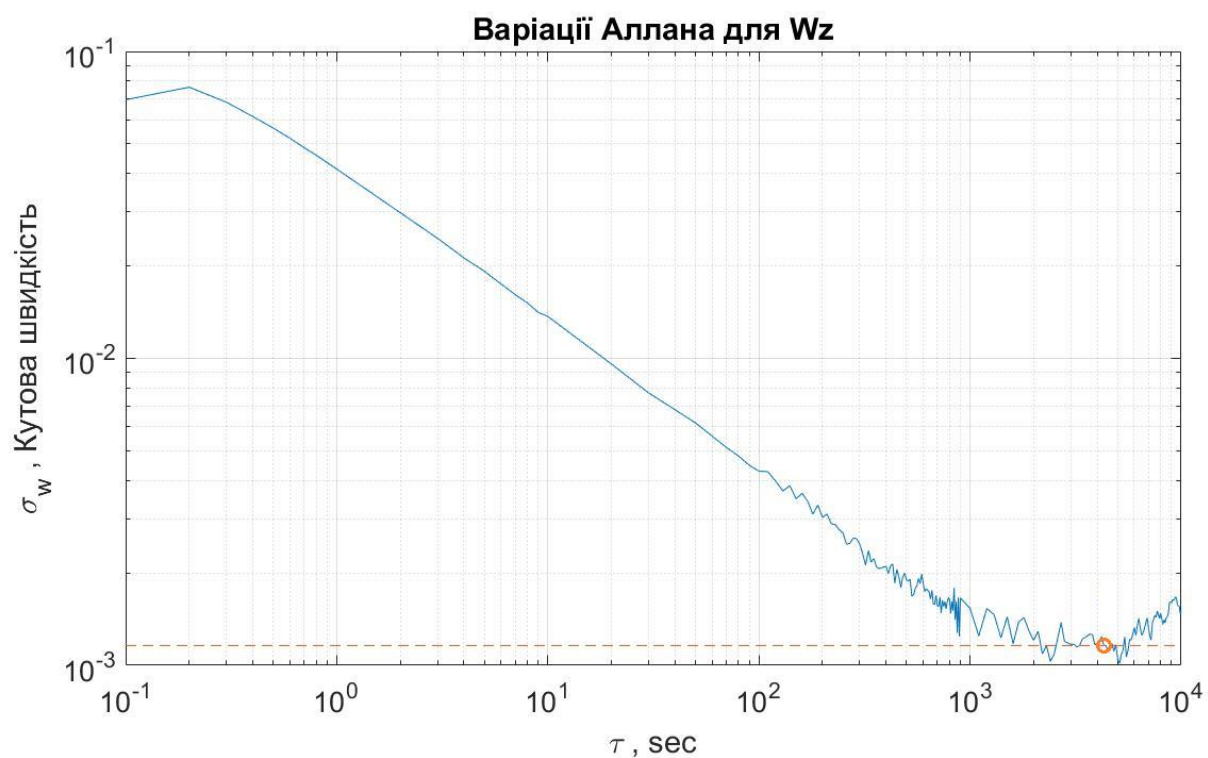


Рисунок 3.15 – Варіації Аллана для Wz з нестабільним зміщенням нуля

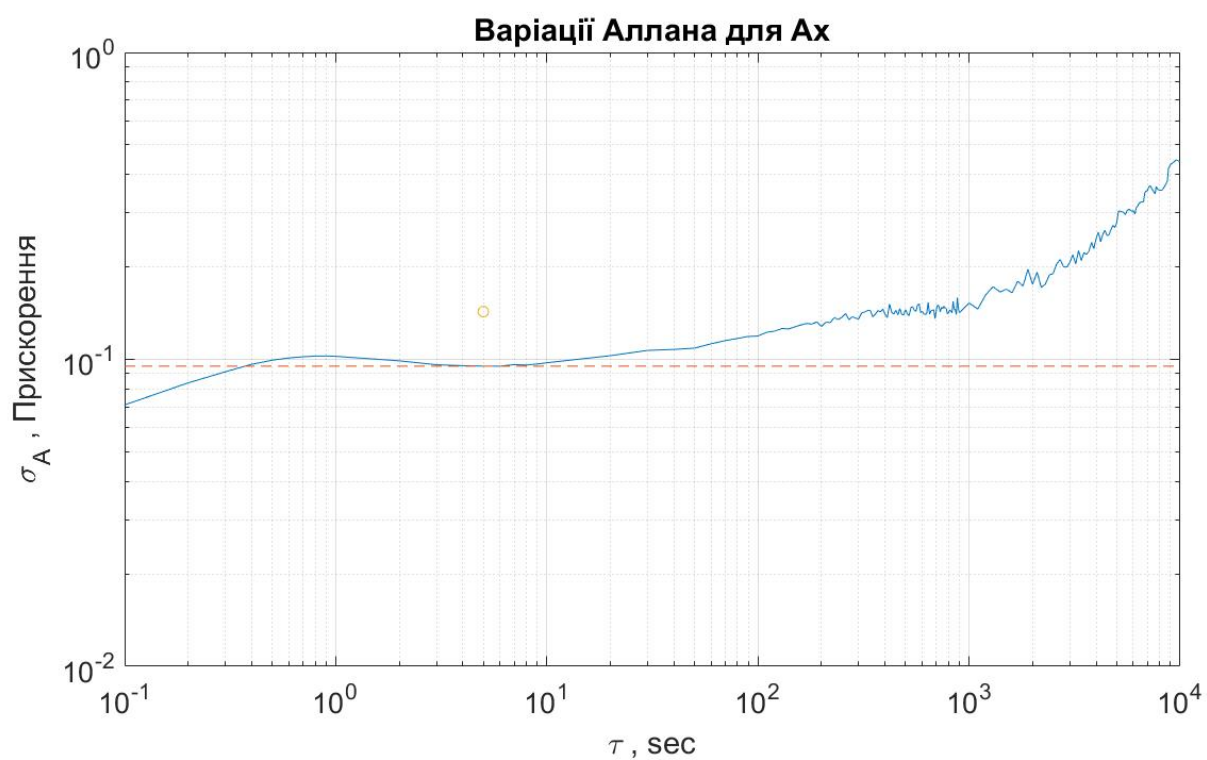


Рисунок 3.16 – Варіації Аллана для Ax з нестабільним зміщенням нуля

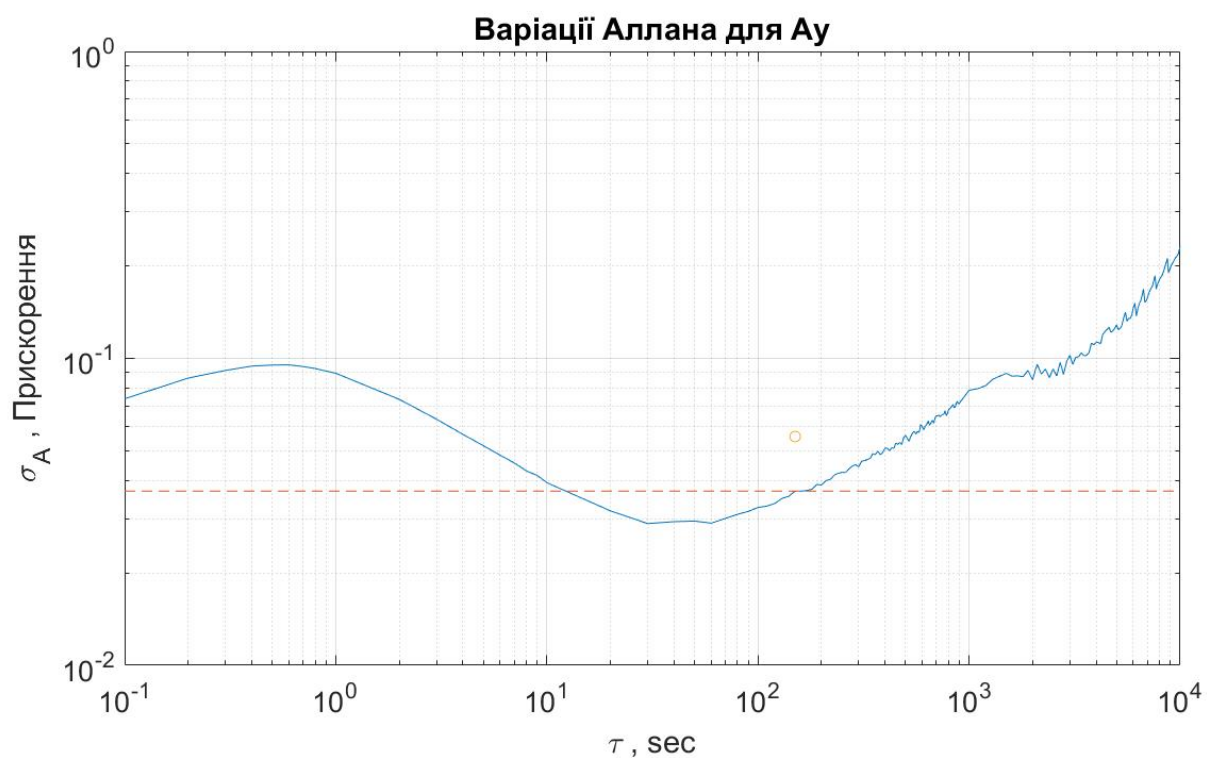


Рисунок 3.17 – Варіації Аллана для Ay з нестабільним зміщенням нуля

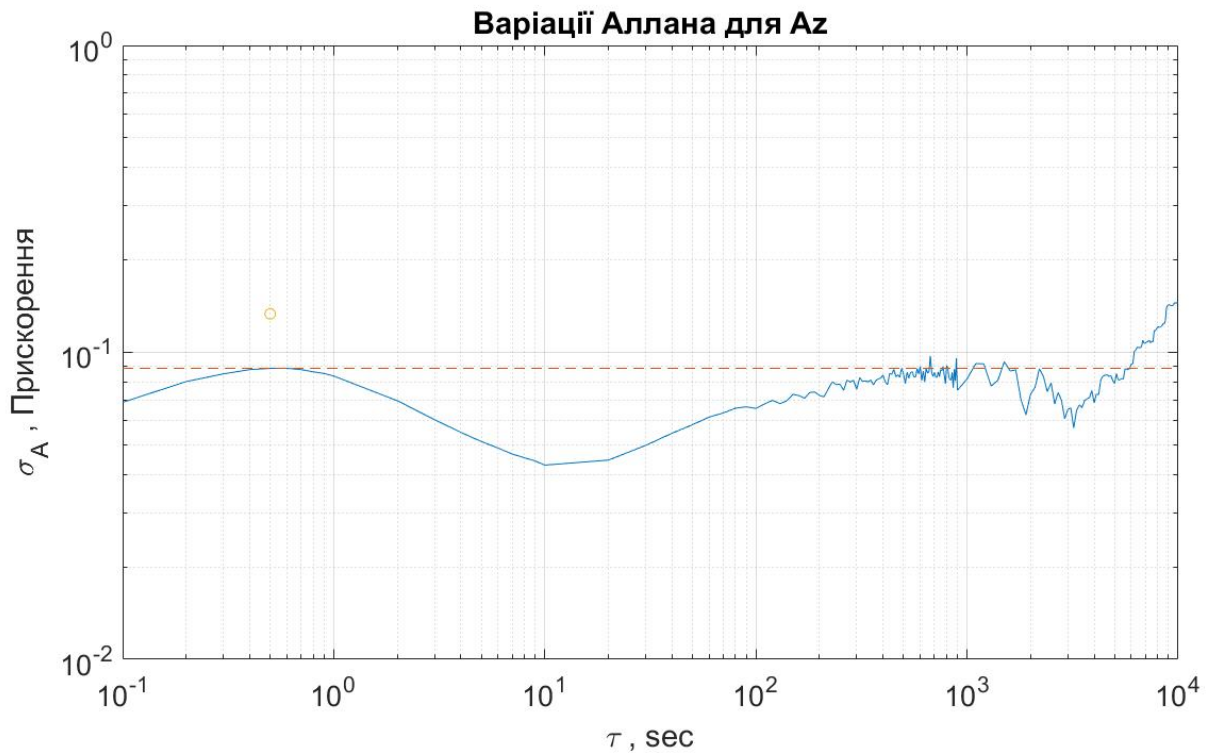


Рисунок 3.18 – Варіації Аллана для Az з нестабільним зміщенням нуля

Далі наведена таблиця вимірних значень (Таблиця 3.3)

	Випадкове блукання кута, N	Випадкове блукання швидкості, K	Нестабільність зміщення нуля, В
W _x	0.0617	1.0988e-04	0.0055
W _y	0.0732	5.1595e-04	0.0061
W _z	0.0426	3.6036e-05	0.0017
A _x	23.3498	0.0096	0.1431
A _y	1.1239	0.0042	0.0556
A _z	1.0237	0.0023	0.1335

Таблиця 3.3 – Дані вимірювань

3.4 Висновок

Як видно з графіків і таблиці гіроскоп показує правильні данні. Але акселерометр показує неточні і неправильні данні, які могли бути визвані поломкою датчика акселерометра. І це підтверджує доцільність використання Варіацій Аллана для перевірки датчиків кутової швидкості, адже ця помилка в даних може визвати неприємні наслідки , якщо датчик буде встановлений на пристрій або радіокерований апарат.

Список виокристаної літератури

1. MAX21105Datasheet[Електронний ресурс]. - Maxim Integrated Inc.Datasheet, 2014.–Режим доступу:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX21105.pdf>
2. ADIS16465Datasheet[Електронний ресурс]. - Analog Devices Inc. 2018, - Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16465.pdf>
3. MS9000DATASHEET[Електронний ресурс]. – Colibrys, 2015. – Режим доступу <https://www.colibrys.com/wp-content/uploads/2015/03/30S-MS9000.M.03.15-nod1.pdf>
4. ISM330DLC Datasheet [Електронний ресурс]. - STMicroelectronics, 2018. – Режим доступу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ism330dlc.pdf>
5. BNO055Datasheet[Електронний ресурс]. – BOSCH, 2016. – Режим доступу: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf
6. MSG3000DDatasheet[Електронний ресурс]. – MTMicrosystems, 2019. – Режим доступу: <https://avi-solutions.com/upload/NEWS/MT%20Microsystems/MSG3000D+Multi-Axis+Gyro+Module+User+Manual.pdf>
7. STIM210Datasheet[Електронний ресурс]. – Sensoror, 2015. – Режим роботи: <https://www.sensoror.com/media/1101/ts1545r16-datasheet-stim210.pdf>
8. MC3672Datasheet[Електронний ресурс]. – mCube, 2016. – Режим доступу: <https://mcubemems.com/wp-content/uploads/2016/12/MC3672-Preliminary-Datasheet-APS-045-0018v1.0.pdf>
9. CRG20Datasheet[Електронний ресурс]. – SiliconSensing. – Режим доступу: <https://www.siliconsensing.com/media/30951/crg20-00-0100-110-rev-11.pdf>
- 10.FXLS8962AFDatasheet[Електронний ресурс]. – NXP, 2019. – Режим роботи: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXLS8962AF.pdf>
- 11.MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino[Електронний ресурс]. - <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>
- 12.Allan Variance[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://home.engineering.iastate.edu/~shermanp/AERE432/lectures/Rate%20Gyros/Allan%20variance.pdf>
- 13.В.В. Аврутов. Испытания инерциальных приборов. – Київ.НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». – 2016, 205с.

Додаток А

```
clc
clear all
load GAH

mas1=Gz;
dtN=Hz;
[M1,N1]=size(mas1); %розмір масиву

Mlog=[1:9, 10:10:90, 100:100:900, 1000:100:9000, 10000:1000:100000];
MmaxL=max(size(Mlog));
Mmax=max(Mlog);

%Перевірка відповідностей
if Mmax > N1/2
% Mmax=fix(N1/2);
disp('ОШИБКА: Mmax > N1/2');
end %if Mmax

%Ініціалізація масивів
tau=zeros(1,MmaxL);
AL=zeros(1,N1);
AL2A=zeros(1,MmaxL);

wb=waitbar(0,'Идут вычисления...');

tic % Start a stopwatch timer

for i=1:MmaxL
M=fix(Mlog(i)); % M – розмір групи
K=fix(N1/M); % Кількість груп
tau(i)=M*dtN;

for RK=1:K
AL(RK)=mean(mas1((RK-1)*M+1:RK*M)); %Масив середніх значень в групі
end

Sum1=0;
for RK=1:K-1
Razn=AL(RK+1)-AL(RK);
Sum1=Sum1+Razn*Razn;
end

AL2A(i)=(1/(2*(K-1)))*Sum1;
AL2A(i)=sqrt(AL2A(i));
% disp(M);

%if (i<10) | (rem(i,10)==0)
```

```

        waitbar(M/Mmax,wb,strcat('Іде вичислення, М =',num2str(M)));
    %end; % if

end %for i=1:MmaxL

close(wb);
t_Allan=toc; %Read the stopwatch timer.
disp(strcat('Сумарний час вичислення варіацій =',num2str(t_Allan),' с'));

% ===== Графік =====
scrsz = get(0,'ScreenSize')
figure('Position',[70 70 scrsz(3)/1.5 scrsz(4)/1.5]);%hold on;
%loglog(tau,AL2A,'b','LineWidth',2);
loglog(tau,AL2A,tau, lineK, '--', tauK, K, 'o');
grid, set(gca, 'FontName','Arial Cyr','FontSize',16)
% title(['Allan Variance for gyro # ' num2str(N_DUS)]);
title(['Варіації Аллана для Az']);
xlabel('\tau , sec');
ylabel('\sigma_A , Прискорення');

```

Додаток Б

-
-
-

```
slope = -0.5;  
logtau = log10(tau);  
logadev = log10(AL2A);  
dlogadev = diff(logadev) ./ diff(logtau);  
[~, i] = min(abs(dlogadev - slope));
```

```
% Find the y-intercept of the line.
```

```
b = logadev(i) - slope*logtau(i);
```

```
% Determine the angle random walk coefficient from the line.
```

```
logN = slope*log(1) + b;
```

```
N = 10^logN
```

```
% ===== Графік =====
```

```
tauN = 1;
```

```
lineN = N ./ sqrt(tau);
```

```
scrsz = get(0, 'ScreenSize')
```

```
figure('Position',[70 70 scrsz(3)/1.5 scrsz(4)/1.5]);%hold on;
```

```
%loglog(tau,AL2A,'b','LineWidth',2);
```

```
loglog(tau,AL2A,tau, lineK, '--', tauK, K, 'o');
```

```
grid, set(gca, 'FontName','Arial Cyr','FontSize',16)
```

```
% title(['Allan Variance for gyro # ' num2str(N_DUS)]);
```

```
title(['Варіанці Аллана для Az']);
```

```
xlabel('\tau , sec');
```

```
ylabel('\sigma_A , Прискорення');
```

Додаток В

-
-
-

```
slope = 0.5;
logtau = log10(tau);
logadev = log10(AL2A);
dlogadev = diff(logadev) ./ diff(logtau);
[~, i] = min(abs(dlogadev - slope));
```

```
% Find the y-intercept of the line.
```

```
b = logadev(i) - slope*logtau(i);
```

```
% Determine the rate random walk coefficient from the line.
```

```
logK = slope*log10(3) + b;
```

```
K = 10^logK
```

```
% ===== Графік =====
```

```
tauK = 3;
```

```
lineK = K .* sqrt(tau/3);
```

```
scrsz = get(0, 'ScreenSize')
```

```
figure('Position',[70 70 scrsz(3)/1.5 scrsz(4)/1.5]);%hold on;
```

```
%loglog(tau,AL2A,'b','LineWidth',2);
```

```
loglog(tau,AL2A,tau, lineK, '--', tauK, K, 'o');
```

```
grid, set(gca, 'FontName','Arial Cyr','FontSize',16)
```

```
% title(['Allan Variance for gyro # ' num2str(N_DUS)]);
```

```
title(['Варіанці Аллана для Az']);
```

```
xlabel('\tau , sec');
```

```
ylabel('\sigma_A , Прискорення');
```


Додаток Г

-
-
-

```
slope = 0;
logtau = log10(tau);
logadev = log10(AL2A);
dlogadev = diff(logadev) ./ diff(logtau);
[~, i] = min(abs(dlogadev - slope));
```

% Find the y-intercept of the line.

```
b = logadev(i) - slope*logtau(i);
```

% Determine the bias instability coefficient from the line.

```
scfB = sqrt(2*log(2)/pi);
logB = b - log10(scfB);
B = 10^logB
```

% ===== График =====

```
tauB = tau(i);
lineB = B * scfB * ones(size(tau));
scrsz = get(0,'ScreenSize')
figure('Position',[70 70 scrsz(3)/1.5 scrsz(4)/1.5]);%hold on;
%loglog(tau,AL2A,'b','LineWidth',2);
loglog(tau,AL2A,tau, lineK, '--', tauK, K, 'o');
grid, set(gca, 'FontName','Arial Cyr','FontSize',16)
% title(['Allan Variance for gyro # ' num2str(N_DUS)]);
title(['Варіанці Аллана для Az']);
xlabel('\tau , sec');
ylabel('\sigma_A , Прискорення');
```